Dok-Nr. 68091

Zement

Taschenbuch 2000

49. Ausgabe

Verein
Deutscher Zementwerke e.V.

Zement

Taschenbuch 2000

49. Ausgabe

Verein
Deutscher Zementwerke e.V.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Zement-Taschenbuch 2000
Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Düsseldorf.
– Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2000
ISBN 3-7640-0399-5

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)
© by Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2000
Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf
Druck/Verarbeitung: B.o.s.s Druck und Medien, Kleve

Vorwort

Mit der vorliegenden 49. Ausgabe des Zement-Taschenbuchs gibt der Verein Deutscher Zementwerke nach mehr als 16 Jahren sein umfassendes Informations- und Nachschlagewerk in grundlegend überarbeiteter Form neu heraus. Bereits seit 1911 – zunächst als jährlich erscheinender Zementkalender – dann ab 1950 in der bewährten Taschenbuchform fasst das Zement-Taschenbuch jeweils die aktuellen Kenntnisse über die Zementherstellung und -anwendung zusammen. Dieser Tradition folgend wurde der Inhalt des Zement-Taschenbuchs für die vorliegende Ausgabe den neuesten Erkenntnissen aus Forschung und Erfahrung angepasst. Durch die Aufnahme neuer Themenschwerpunkte nahm der Umfang des Zement-Taschenbuchs erneut zu, ohne dass jedoch auf die bewährte handliche Form verzichtet werden musste.

Die Jahre seit dem Erscheinen der 48. Ausgabe waren geprägt durch die enormen Anstrengungen der Zementindustrie, den Energiebedarf für die Zementherstellung zu reduzieren und gleichzeitig durch produktionsintegrierte Maßnahmen die Emissionen des Klinkerbrennprozesses weiter zu vermindern. Ein entsprechend breiter Raum wird der Verfahrenstechnik eingeräumt und dabei der Stand der Technik zur Emissionsminderung herausgestellt.

Neu- und Weiterentwicklungen der Betonbauweisen konzentrieren sich zurzeit auf die Herstellungs- und Verarbeitungstechnik der Betone. Das Zement-Taschenbuch behandelt hierzu die aktuellen Ergebnisse über den Einsatz von selbstverdichtendem

Beton sowie die Möglichkeiten des Betonrecyclings. Einen breiten Raum nimmt die Erweiterung der Gebrauchseigenschaften von Betonen, insbesondere in Richtung hochdichter und hochfester sowie besonders widerstandsfähiger Betone, ein.

Die Beschreibung der Umweltverträglichkeit von Zement und Beton wurde neu in das Zement-Taschenbuch aufgenommen. Gleiches gilt für die neuesten Erkenntnisse zum Verhalten von Spurenelementen in der Porenlösung des Zementsteins oder die jüngsten Anforderungen an Beton im Kontakt mit Grundwasser und Boden. Darüber hinaus wird die ganzheitliche Betrachtung der Umweltverträglichkeit mit Hilfe von Ökobilanzen dargestellt.

Für die Themenbereiche der Zementforschung und der Betonanwendung konnte aus der vorhergehenden Ausgabe des Zement-Taschenbuchs Bewährtes übernommen werden. Andere Abschnitte wurden überarbeitet und durch neue Erkenntnisse ergänzt. Dabei wurde sehr schnell deutlich, dass eine aktuelle Darstellung nur vor dem Hintergrund der derzeit gültigen Normen für Zement und Beton erfolgen kann. Es ergab sich jedoch die Schwierigkeit, dass die Arbeiten an der europäischen Zementnorm EN 197 und an der europäischen Betonnorm EN 206 nach langjährigen Beratungen erst während der Endredaktion des Zement-Taschenbuchs durch Zustimmung der nationalen Normungsgremien abgeschlossen werden konnten. In der vorliegenden Ausgabe des Zement-Taschenbuchs wurde daher sowohl auf die bestehende Fassung der Zementnorm DIN 1164 von 1994 als auch auf die inzwischen angenommene EN 197 Bezug genommen. Das Zement-Taschenbuch orientiert sich ferner an den Festlegungen der neuen deutschen Betonnorm, die in den vier Teilen von E DIN 1045 vorgesehen sind. Dies gilt insbesondere für die betontechnologischen Ausführungen, die sich auf E DIN 1045-2 beziehen. Hierbei wurden Änderungen der Einspruchssitzungen weitgehend berücksichtigt (Stand: März 2000). Die E DIN 1045-2 enthält die Festlegungen der europäischen

Betonnorm EN 206-1 „Betonleistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität" und zusätzlich die zu deren Anwendung darüber hinaus in Deutschland erforderlichen Ergänzungen bzw. geltenden Abweichungen. E DIN 1045-2 fasst somit die europäische Betonnorm und das zugehörige deutsche Anwendungsdokument zusammen und entspricht inhaltlich dem zukünftig in Deutschland geltenden Regelwerk für Beton. Es wurde deshalb als Bezugsdokument gewählt. Zur Zeit der Drucklegung des Zement-Taschenbuchs ist noch nicht eindeutig geklärt, in welcher Form und mit welchem Titel dieses deutsche Regelwerk für Beton veröffentlicht und bauaufsichtlich eingeführt wird.

Das Zement-Taschenbuch wird abgerundet durch eine Aufstellung der wichtigsten Baunormen, Richtlinien und Merkblätter sowie eine Zusammenstellung aller VDZ-Mitgliedsunternehmen mit ihren Standorten und mit ihren jeweiligen Lieferprogrammen.

Die Mitarbeiter des Forschungsinstituts haben in einer Gemeinschaftsarbeit dazu beigetragen, dass das Zement-Taschenbuch in seiner bewährten äußeren Form, aber in einer vollständig neu überarbeiteten Ausgabe erscheinen kann. Viele Anregungen aus der Zementindustrie und aus befreundeten Institutionen wurden eingearbeitet. Der Verlag Bau+Technik hat sachkundig und mit viel Geduld trotz des hohen Termindrucks dazu beigetragen, dass das vorliegende Zement-Taschenbuch in ansprechendem Layout zum geplanten Termin erscheinen konnte. Allen, die durch ihre Mitarbeit dazu beigetragen haben, dass dieses Zement-Taschenbuch in seiner 49. Ausgabe neu herausgegeben werden konnte, sei an dieser Stelle recht herzlich gedankt.

Düsseldorf, im Mai 2000

Verein Deutscher Zementwerke e.V

Inhaltsverzeichnis

I Zement 1

1 Geschichtliche Entwicklung der Zemente 3

2 Zementarten 19

2.1 Normung ... 19
2.2 Zementarten ... 21
2.3 Qualitätssicherung ... 28
2.4 Zemente mit besonderen Eigenschaften ... 30

3 Zementherstellung 33

3.1 Einsatzstoffe ... 33
3.1.1 Einsatzstoffe für den Klinkerbrennprozess ... 33
3.1.2 Hauptbestandteile des Zements ... 38
3.2 Verfahrenstechnik ... 47
3.2.1 Klinkerherstellung ... 47
3.2.2 Reaktionen beim Brennen und Kühlen des Klinkers ... 63
3.2.3 Zementherstellung durch Mahlen und Mischen ... 67
3.2.4 QM-Systeme bei der Zementherstellung ... 76
3.3 Umweltvorsorge ... 78
3.3.1 Emissionen ... 78
3.3.2 Emissionsminderung ... 87
3.3.3 Klimaaspekte ... 93
3.4 Arbeitssicherheit ... 96
3.4.1 Herstellung von Zement ... 97
3.4.2 Umgang mit Zement ... 102

4 Hydratation des Zements und Gefüge des Zementsteins 111
4.1 Hydratation des Zements ... 111
4.1.1 Hydratphasen ... 111
4.1.2 Hydratationsablauf ... 116
4.1.3 Hydratationswärme ... 125
4.2 Gefüge des Zementsteins ... 127
4.2.1 Gefügeaufbau ... 127
4.2.2 Wasserbindung ... 132
4.2.3 Porenlösung ... 136

5 Bautechnische Eigenschaften des Zements 139
5.1 Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung ... 141
5.2 Ansteifen und Erstarren ... 144
5.3 Wasseranspruch ... 149
5.4 Verarbeitbarkeit ... 150
5.5 Erhärten und Festigkeit ... 151
5.6 Raumbeständigkeit ... 154
5.7 Transportvorgänge im Zementstein ... 154
5.8 Chemische Widerstandsfähigkeit ... 162
5.8.1 Lösender Angriff ... 162
5.8.2 Treibender Angriff ... 163
5.8.3 Carbonatisierung ... 167
5.8.4 Sulfatwiderstand ... 170
5.9 Umweltverträglichkeit (Auslaugen/Ausgasen) ... 172

II Beton 177

1 Übersicht 179
1.1 Definitionen und Normung ... 179
1.2 Geschichtliche Entwicklung des Baustoffs Beton und der Betonkonstruktionen ... 185

2 Ausgangsstoffe 195

2.1 Zement ... 195
2.1.1 Leistungsmerkmale und Anwendungsbereiche .. 195
2.1.2 Baupraktische Anwendung ... 204
2.2 Betonzusatzstoffe ... 209
2.2.1 Zusatzstoffarten ... 209
2.2.2 Reaktive Zusatzstoffe (Typ II) ... 210
2.2.3 Inerte Zusatzstoffe (Typ I) ... 219
2.2.4 Organische Zusatzstoffe ... 221
2.3 Zugabewasser ... 223
2.4 Betonzusatzmittel ... 224
2.4.1 Übersicht ... 224
2.4.2 Normen und Definitionen ... 224
2.4.3 Wirkungsgruppen ... 228
2.4.4 Umweltverträglichkeit ... 237
2.5 Zuschlag (Gesteinskörnungen) für Beton und Mörtel .. 240
2.5.1 Definitionen, Begriffe, Normen ... 240
2.5.2 Normalzuschlag ... 241
2.5.3 Leichtzuschlag ... 243
2.5.4 Schwerzuschlag ... 245
2.5.5 Rezyklierter Zuschlag ... 247
2.5.6 Eigenschaften und Anforderungen ... 247
2.5.7 Überwachung ... 255
2.5.8 Kornzusammensetzung des Zuschlags ... 255
2.5.9 Wasseranspruch ... 258
2.6 Fasern ... 258
2.6.1 Definition ... 258
2.6.2 Eigenschaften von Fasern in Beton und Mörtel . 258
2.6.3 Übereinstimmungsnachweis und Prüfungen ... 261
2.6.4 Lieferformen und Einmischen in Beton und Mörtel ... 261

3 Entwurfskriterien und Zusammensetzung 263
3.1 Variationsmöglichkeiten des 5-Stoff-Systems ... 263
3.2 Entwurfsgrundlagen für Frischbeton ... 267
3.3 Entwurfsgrundlagen für Festbeton ... 270
3.3.1 Anforderungen ... 270
3.3.2 Wasserzementwert ... 271
3.3.3 Verformungen unter Last ... 272
3.3.4 Lastunabhängige Verformungen ... 280
3.3.5 Dauerhaftigkeit ... 280
3.4 Grundlagen für die Zusammensetzung von Beton gemäß E DIN 1045 (Mischungsentwurf) ... 281
3.4.1 Zusammenstellung der Anforderungen ... 281
3.4.2 Mischungsentwurf für die Erstprüfung (Eignungsprüfung) ... 284

4 Frischbeton und Verarbeitung 287
4.1 Verarbeitbarkeit ... 287
4.2 Konsistenz ... 287
4.2.1 Prüfung der Konsistenz ... 289
4.2.2 Konsistenzsteuerung ... 290
4.3 Frischbetonrohdichte und Luftgehalt ... 296
4.4 Frischbetontemperatur ... 297
4.5 Übergang vom Frischbeton zum Festbeton ... 299
4.6 Selbstverdichtender Beton ... 301

5 Festigkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton 305
5.1 Festigkeit ... 305
5.1.1 Festigkeitsarten ... 305
5.1.2 Druckfestigkeit von Beton ... 306
5.1.3 Zugfestigkeit von Beton ... 310
5.2 Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung ... 312
5.3 Festigkeits- und Hydratationswärmeentwicklung ... 315

5.3.1 Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme . 315
5.3.2 Adiabatische Bauteilbedingungen 317
5.3.3 Teiladiabatische Bedingungen 321
5.3.4 Einfluss der Frischbeton- bzw. Umgebungstemperatur auf die Festigkeitsentwicklung 324
5.4 Alters- und temperaturabhängiger Verlauf der Druckfestigkeit 327
5.4.1 Reife des Betons 327
5.4.2 Nacherhärtung 330
5.5 Erforderliche Erhärtungszeiten (Ausschalfristen) 332

6 Formänderung von Beton 333

6.1 Verformungsursachen 333
6.2 Formänderungen bei äußerer Lasteinwirkung 333
6.2.1 Last-Verformungsverhalten 333
6.2.2 Verformungen bei Kurzzeitbelastung 335
6.2.3 Verformungen unter Dauerbeanspruchung 341
6.3 Lastunabhängige Verformungen 343
6.3.1 Ursachen 343
6.3.2 Hygrisch bedingte Verformungen 344
6.3.3 Treiben 348
6.3.4 Wärmedehnungsverhalten 349
6.4 Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen im jungen Beton 350

7 Dauerhaftigkeit 357

7.1 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand 357
7.1.1 Frost- und Frost-Tausalz-Angriff 357
7.1.2 Schädigungsvorgänge 357
7.1.3 Luftporenkennwerte 361
7.1.4 Prüfverfahren 362
7.1.5 Folgerungen für die Praxis zum Erreichen eines ausreichenden Frostwiderstands 364

7.1.6 Folgerungen für die Praxis zum Erreichen eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands 364
7.2 Bewehrungskorrosion 367
7.2.1 Alkalischer Korrosionsschutz 367
7.2.2 Carbonatisierung 368
7.2.3 Chlorideindringung 372
7.2.4 Korrosionsprozess 375
7.2.5 Folgerungen für die Praxis 379
7.3 Chemischer Angriff 382
7.3.1 Betonkorrosion durch lösende Angriffe 382
7.3.2 Folgerungen für die Praxis bei lösendem Angriff 385
7.3.3 Betonkorrosion durch Sulfatangriff 394
7.3.4 Folgerungen für die Praxis bei treibendem Angriff 396
7.4 Hydrolyse 397
7.4.1 Reaktionsabläufe 397
7.4.2 Auswirkungen auf Betonbauteile und Folgerungen für die Praxis 399
7.5 Verschleiß 401
7.5.1 Beanspruchung 401
7.5.2 Prüfmethoden 403
7.5.3 Folgerungen für die Praxis 404
7.6 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) 409
7.6.1 Einstufung und Prinzip einer AKR 409
7.6.2 Voraussetzungen für eine schädigende AKR 410
7.6.3 Schadensablauf 415
7.6.4 Schäden in der Praxis 416
7.6.5 Folgerungen für die Praxis zur Vermeidung einer schädigenden AKR 417

8 Brandschutz 423

8.1 Brandschutzziele ... 423
8.2 Hochtemperaturverhalten von Beton ... 423
8.3 Klassifizierung von Baustoffen und Bauteilen sowie deren Dimensionierung ... 429

9 Herstellung und Verarbeitung 435

9.1 Herstellen des Betons ... 435
9.2 Befördern des Betons ... 438
9.3 Fördern des Betons ... 441
9.4 Einbringen und Verdichten des Betons ... 445
9.5 Entschalen des Betons ... 450
9.6 Nachbehandlung und Schutz des Betons ... 450

10 Besondere Betone 457

10.1 Spritzbeton ... 457
10.2 Schleuderbeton ... 462
10.3 Gleitbauverfahren ... 463
10.4 Massenbeton ... 466
10.5 Unterwasserbeton ... 468
10.5.1 Anwendungsbereiche und Verfahren ... 468
10.5.2 Beton für Unterwasserschüttung ... 470
10.5.3 Unterwasser-Injektionsbeton ... 477
10.6 Vakuumbeton ... 481
10.7 Sichtbeton ... 483

11 Fertigteile 485

11.1 Produktgruppen und Betonarten ... 485
11.2 Wärmebehandlung von Beton ... 490

12 Verkehrswegebau 497

12.1 Übersicht über zementgebundene Bauweisen ... 497
12.2 Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln ... 497

12.3 Betondecken 502
12.3.1 Beanspruchungen und Konstruktionsmerkmale . 502
12.3.2 Betontechnologie 506
12.3.3 Gebrauchseigenschaften von Betonfahrbahndecken 510
12.4 Feste Fahrbahn 516
12.5 Betonschutzwände 518

13 Betonbauwerke mit Anforderungen an die Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen 519

13.1 Anwendungsbereich 519
13.2 Kriterien für die Dichtheit einer Betonkonstruktion 519
13.3 Dichtheit des Baustoffs Beton 520
13.4 Begrenzung der Rissbreiten 524
13.5 Herstellung dichter Bauteilfugen 526
13.6 Anforderungen an wasserundurchlässige Bauwerke 528
13.7 Betonbau beim Umgang mit umweltgefährdenden Stoffen 529
13.7.1 Regelungen für die Bauweise 529
13.7.2 Einzelregelungen der DAfStb-Richtlinie BUmwS 531
13.7.3 Herstellung und Prüfung besonders dichter Betone 535

14 Mörtel für spezifische Anwendungsbereiche und Estrich 541

14.1 Mörtelarten und Definitionen 541
14.2 Mauermörtel 544
14.3 Putzmörtel 546
14.4 Auskleidungsmörtel für Trinkwasserrohre 548
14.5 Estrich 549
14.6 Einpressmörtel 552
14.7 Zementmörtel gemäß E DIN 1045 554

15 Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken 555
15.1 Planungsgrundsätze ... 555
15.2 Regelwerke für die Instandsetzung von Betonbauwerken ... 555
15.3 Planung, Instandsetzungsbaustoffe, Ausführung und Überwachung gemäß DAfStb-Richtlinie SIB ... 559
15.3.1 Planung ... 559
15.3.2 Instandsetzungsbaustoffe und Ausführung ... 562
15.3.3 Überwachung ... 565
15.4 Instandsetzung von brandbeanspruchten Betonbauteilen ... 568

16 Recycling im Betonbau 569
16.1 Restwasser- und Restbetonrecycling ... 569
16.2 Festbetonrecycling ... 571
16.2.1 Rezyklierter Zuschlag ... 571
16.2.2 Frischbetoneigenschaften ... 572
16.2.3 Festbetoneigenschaften ... 572
16.2.4 Richtlinie ... 574

17 Qualitätssicherung im Werk und auf der Baustelle 575
17.1 Qualitätssicherungsnachweise ... 575
17.2 Verantwortung des Herstellers ... 578
17.2.1 Werkseigene Produktionskontrolle ... 578
17.2.2 Überwachungsprüfungen ... 579
17.2.3 Qualitäts- und Produktionslenkung ... 583
17.3 Aufgaben der anerkannten Stellen ... 584
17.4 Identitäts-, Annahme- und Kontrollprüfungen ... 585

18 Umweltverträglichkeit 587
18.1 Überblick ... 587
18.2 Boden- und Grundwasserschutz ... 589

18.2.1 Rechtliche Vorgaben 589
18.2.2 Beurteilung einer möglichen Boden- und Grundwassergefährdung 590
18.2.3 Bewertungskonzept und Bewertungskriterien 592
18.2.4 Besonderheiten bei der Bewertung von Bauprodukten aus Beton 596
18.3 Zementgebundene Bauprodukte im Kontakt mit Trinkwasser 596
18.4 Einfluss zementgebundener Baustoffe auf die Innenraumluft 602
18.5 Ökobilanzen 606

III DIN1164-1 615

IV Anhang 641

1 Literaturverzeichnis 643

2 Wichtige Baunormen, Richtlinien, Merkblätter, Gesetze und Verordnungen, ausländische Normen und Richtlinien 681

3 Allgemeine und bautechnische Tafeln 725

4 Stichwortverzeichnis 749

5 Organisationen der Zementindustrie und Verzeichnis der im VDZ zusammengeschlossenen Zementwerke 759

Zement

Kapitel I

1 Geschichtliche Entwicklung der Zemente

Zement ist ein hydraulisch erhärtender Baustoff. Er besteht aus einem Gemisch fein aufgemahlener, nichtmetallisch-anorganischer Bestandteile. Zement kann durch gemeinsames Vermahlen des bis zur Sinterung gebrannten Portlandzement-klinkers mit anderen Haupt- und Nebenbestandteilen oder durch Mischen getrennt feingemahlener Haupt- und Nebenbestandteile hergestellt werden. Nach Zugabe von Wasser entsteht eine Suspension (Zementleim), die aufgrund einsetzender Hydratationsreaktionen sowohl an der Luft als auch unter Wasser erstarrt und erhärtet. Nach der Erhärtung ist der so entstandene Zementstein raumbeständig, fest und auch bei Lagerung unter Wasser dauerhaft. Zement wird hauptsächlich als Bindemittel für Beton und Mörtel verwendet. Im frischen Zustand ermöglicht der Zementleim die beliebige Formbarkeit des Gemisches mit Sand und gröberem Zuschlag, im festen Zustand verbindet der Zementstein dieses Zuschlaggerüst in Form eines erhärteten „Klebers". Die hydraulische Erhärtung von Zementen nach DIN 1164 bzw. prEN 197-1 beruht, anders als bei nicht hydraulischen Bindemitteln, wie z. B. Baukalken nach DIN 1060, Putz- und Mauerbindern nach DIN 4211 oder Baugipsen nach DIN 1168, vorwiegend auf der Entstehung von Calciumsilicathydraten. Die verschiedenen Bestandteile des Zements hydratisieren dabei unterschiedlich schnell. Kennzeichnendes Merkmal ist eine durch Norm festgelegte Mindestdruckfestigkeit von 32,5 N/mm^2. Außer den Calciumsilicaten des Portlandzement-klinkers und der beteiligten Phasen von latent hydraulischen sowie puzzolanischen Bestandteilen, beeinflussen u. a. auch

Calciumaluminate die Hydratationsreaktionen und damit das Erstarren und die Festigkeitsbildung. Das Erstarren und Erhärten von Calciumaluminatzement (Tonerdezement) beruht im Gegensatz dazu auf der Bildung von Calciumaluminathydraten.

Portlandzement

Der Name des Baustoffs „Zement" geht auf die Römer zurück, die seit dem 3. Jahrhundert v. Chr. Bauwerke aus einem Gemisch von Bruchstein, Puzzolan- und Ziegelmehl sowie Sand unterschiedlicher Korngröße und gebranntem Kalk als Bindemittel mit „*Opus Caementitium*" bezeichneten. Die Bauweise wurde für Mauern, Kuppeln, Brücken, Hafenanlagen, Wasser- und Abwasseranlagen sowie beim Bau von Straßen angewendet. Überliefert sind die Kenntnisse über die Bauplanung und Architektur sowie über den Baustoff und die Bauausführung von dem römischen Baumeister Vitruv, der wahrscheinlich im letzten Jahrhundert v. Chr. gelebt und gearbeitet hat. Später wurden die feinen „Zusatzstoffe" wie natürliche Puzzolane oder Ziegelmehl als „Caementum" bezeichnet, das mit gebranntem und gelöschtem Kalk vermischt und mit Wasser versetzt bei ausreichend langer Feuchtlagerung hydraulisch erhärtete und im „Römerbeton" zu Druckfestigkeiten von etwa 5 bis 40 N/mm^2 führte. Diese Zuordnung des Begriffs „Caementum" und seiner Abwandlungen „Cementum", „Cimentum" oder „Cement" blieb bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts n. Chr. erhalten.

Ein Wandel der Zuordnung trat im 18. Jahrhundert ein. Der Engländer John Smeaton (1724–1792) entdeckte, dass Kalkbindemittel, die aus einem mit Tonmineralien verunreinigten Kalkstein gebrannt werden, von sich aus und bereits ohne Zugabe von puzzolanischen Zusatzstoffen hydraulisch erhärteten. Er nutzte diese Erkenntnis beim Bau des Eddystone-Leuchtturms bei Plymouth, für den er einen wasserbeständigen Mörtel

benötigte. 1796 ließ sich sein Landsmann James Parker ein hydraulisch erhärtendes Produkt patentieren, das er aus einem natürlichen, noch stärker tonhaltigen Kalkmergel gebrannt und als „Romancement" auf den Markt gebracht hatte. Damit wurde erstmals ein selbst erhärtendes Bindemittel und nicht ein puzzolanischer Zusatzstoff als „Zement" bezeichnet. Die beiden Kalkbindemittel von J. Smeaton und J. Parker sind mit Wasserkalk bzw. hydraulischem Kalk vergleichbar, da sie nicht bis zur Sinterung erhitzt wurden.

Der Engländer Edgar Dobbs war der erste Baustoffhersteller, der bereits 1810 ein Patent für einen hydraulischen Kalk erhielt, der aus einem künstlichen Gemisch von Kalkstein und tonmineralhaltigen Ausgangsstoffen bestand. Der Franzose Louis J. Vicat (1786–1861) und der Deutsche J. F. John fanden unabhängig voneinander heraus, dass sich Gemische aus Kalkstein und 25 bis 30 M.-% Ton am besten dafür eigneten, hydraulische Kalke mit verhältnismäßig hohen Festigkeiten herzustellen. Aufgrund der systematischen Untersuchung unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen wird J. F. John als derjenige angesehen, der den Grundstein auch für die wissenschaftliche Untersuchung der Herstellung und Eigenschaften von Zement legte. Seine Erkenntnis bestand vor allem darin, dass Kalk, Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxide während des Brennens bei Temperaturen unter 1000 °C Verbindungen bilden, die bei Wasserzugabe hydraulisch erhärten.

Auch das Bindemittel, das der Engländer Joseph Aspdin (1778–1855) aus einem künstlichen Gemisch von Kalkstein und Ton herstellte, sich 1824 patentieren ließ und das er aufgrund seiner verbesserten Eigenschaften als „Portland-Cement" bezeichnete, war nach heutigem Wissen in seiner Zusammensetzung und in seinen Eigenschaften mit dem Bindemitteltyp „Romanzement" vergleichbar und noch nicht bis zur Sinterung

gebrannt. Die Bezeichnung „Portland-Cement" lehnte sich in erster Linie aus Marketinggründen an den bewährten und gut eingeführten Portlandstein an. Dabei handelte es sich um einen natürlichen Kalkstein, der auf der Halbinsel Portland (Grafschaft Dorsetshire) an der Kanalküste als Werkstein abgebaut wurde und den aus *„Portland-Cement"* gefertigten Kunstprodukten farblich sehr ähnlich sah.

William Aspdin (1815–1864), ein Sohn Joseph Aspdins, war offenbar der Erste, der 1843 in einem neu erbauten eigenen Werk in der Nähe Londons einen Portlandzement nach der heutigen Definition herstellte. Dieser Zement erwies sich aufgrund seiner Festigkeitsentwicklung dem Romanzement deutlich überlegen. Ursache hierfür waren höhere Brenntemperaturen, die zumindest zu einer teilweisen Sinterung und damit zur Bildung der für Portlandzementklinker typischen Phasen führten. Die deutlich verbesserten Gebrauchseigenschaften dieses Produkts steigerten die Nachfrage auch auf dem europäischen Kontinent, insbesondere in den Niederlanden und in Deutschland. Die Eigenschaften und der für das Produkt erzielbare Preis stellten aber auch den Anreiz für den Aufbau weiterer *Produktionsstätten* dar [Loc1, Sta1].

Der erste Portlandzement wurde in Deutschland ab 1850 von der Firma Brunkhorst & Westfalen in Buxtehude bei Hamburg hergestellt, andere Produktionsstätten gab es bei Lüneburg (Gebr. Heyn) und bei Itzehoe/Lägerdorf (E. Fewer). In diesen drei Werken war William Aspdin als Berater tätig. Als der eigentliche Begründer der deutschen Zementproduktion auf wissenschaftlicher Grundlage gilt jedoch nach wie vor Hermann Bleibtreu (1824–1881), der die ersten beiden, lange Zeit bestehenden Werke in Züllchow bei Stettin (1855) und in Oberkassel (1856–1858) bei Bonn errichtete. In den folgenden Jahren wurden weitere Werke gegründet, so unter anderem 1864 die Werke Amöneburg (Dyckerhoff) und Rüdersdorf (Guthmann &

Jeserich) sowie 1873/76 Heidelberg und Leimen (J. P. Schifferdecker). In Frankreich begann die Produktion von Portlandzement 1850, in den USA 1870.

In Deutschland wurde die Entwicklung der Portlandzementherstellung zu Ausgang des 19. Jahrhunderts maßgeblich von Wilhelm Michaëlis (1840–1911) vorangebracht. Nach einer technischen und chemischen Ausbildung sowie Praxiserfahrung in einem Zementwerk verschaffte er sich mit der Veröffentlichung seines Buches über die „Hydraulischen Mörtel" Anerkennung und Einfluss. Das Buch enthielt erstmals Anforderungen an die Zusammensetzung einer Rohmischung, mit der ein Klinker gesintert und daraus ein raumbeständiger und verarbeitungsfähiger Portlandzement hoher Festigkeit hergestellt werden konnte. Hierfür definierte er einen „Hydraulischen Modul", nach dem ein Portlandzement hoher Qualität etwa doppelt so viel Kalk aufweisen sollte wie die Summe von Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid. Die Erkenntnisse beruhten auf der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Brennprodukts und der Prüfung der Zugfestigkeit nach einem von ihm festgelegten Verfahren. Erst Jahre später gelang es der *Zementforschung*, die physikalisch-chemischen Grundlagen der Kalkbindung, der Kalksättigung, der Phasenbildung und Konstitution sowie der beim Brennen und Kühlen von Portlandzementklinker ablaufenden Reaktionen und deren Einfluss auf den Hydratationsablauf und die Gebrauchseigenschaften aufzuklären. Diese Forschungsarbeit ist unter anderem mit den Namen A. E. Törnebohm, S. B. und W. B. Newberry, H. Le Chatelier, E. Wetzel, E. Spohn, F. M. Lea, T. W. Parker oder H. Kühl eng verbunden.

Hüttenzemente

Die latent hydraulischen Eigenschaften der granulierten, basischen Hochofenschlacke wurden 1862 von Emil Langen

(Troisdorf) entdeckt. In Anlehnung an ein bereits seit 1853 in England eingeführtes Verfahren zur Erleichterung der Schlackenentsorgung bei der Roheisenherstellung wurde die flüssig aus dem Hochofen austretende Schlacke in einer Rinne mit einem Wasserstrahl abgeschreckt. Dabei erstarrte die Hochofenschlacke weitgehend glasig und fiel als Granulat an, das seit 1902 von Hermann Passow als „Hütten- oder Schlackensand" bezeichnet wurde. Die latent hydraulischen Eigenschaften von *Hüttensand* können alkalisch und/oder sulfatisch angeregt werden. Als alkalische Anreger eignen sich Calciumhydroxid, das durch Hydratation von Branntkalk („Kalkschlackenzement") oder bei der Hydratation von Portlandzementklinker („Eisenportlandzement", „Hochofenzement") entsteht. Eine sulfatische Anregung (H. Kühl, 1908) tritt in hüttensandhaltigen Zementen zusätzlich zur alkalischen Anregung bei normgemäßem Zusatz von Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) und/oder natürlichem Anhydrit ($CaSO_4$ II) ein. Bei Sonderzementen wie „Gipsschlackenzement" oder „Sulfathüttenzement" überwiegt die sulfatische Anregung [Loc1, Sta1].

1880 wurde Hüttensand zum ersten Mal zur Herstellung eines Kalkschlackenzements hoher Festigkeit verwendet. Godhard Prüssing (1828–1903) führte 1882 einen Zusatz von 30 M.-% Hüttensand als Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker bei der Herstellung eines „durch Zuschlag von verbindungsfähiger Kieselsäure verbesserten Portland-Cements" in dem von ihm gegründeten Zementwerk Vorwohle ein. Diese Entscheidung führte wegen des darin gesehenen Verstoßes gegen das 1885 vom Verein Deutscher Cement-Fabrikanten beschlossenen „Reinheitsgebot" zu langjährigen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Auseinandersetzungen und damit zur Trennung der Hüttensand verarbeitenden Werke von den Portlandzementherstellern innerhalb des Vereins.

Hochofenschlacke als Rohstoffkomponente zur Herstellung von Portlandzementklinker wurde 1882 von Th. Narjes und A. Bender in der Portland-Cementfabrik Kupferdreh/Ruhr eingesetzt. Nach diesem Verfahren stellten seit 1882 auch die Portlandzementwerke Stein u. Co. in Wetzlar den Klinker her, den sie jedoch unter anderem auch durch gemeinsames Vermahlen mit 30 M.-% Hüttensand zur Herstellung von Hüttenzementen verwendeten. Dieser Zement erhielt 1901 die Bezeichnung „Eisenportlandzement". Zemente mit höherem Hüttensandgehalt waren seit 1907 als „Hochofenzement" bekannt.

Nachdem daher schon sehr frühzeitig der *Eisenportlandzement* – der heutige Portlandhüttenzement – und in den 40er-Jahren der Ölschieferzement – der heutige Portlandölschieferzement – auf den Markt kamen, wurden in den 70er- und 80er-Jahren der Portlandflugasche- und der Portlandkalksteinzement bauaufsichtlich zugelassen und später in die Zementnorm aufgenommen. Der Trasszement wurde in den 40er-Jahren genormt. Die Verwendung dieser Zemente hat dadurch in den letzten Jahren zugenommen.

Normung von Zement

An der Entwicklung von Verfahren zur Prüfung von Zementeigenschaften und an der Definition von Anforderungen an die Qualität war in Deutschland Wilhelm Michaëlis maßgebend beteiligt. Bereits 1875 veröffentlichte er 17 Kriterien, nach denen die Qualität von Zementen beurteilt werden sollte. Dazu gehörten u. a. eine Mindestzugfestigkeit von 5 kg/cm^2, geprüft an einem Mörtel aus 1 Massenteil Zement und 3 Massenteilen Sand, sowie ein Siebrückstand von maximal 25 M.-% auf dem 0,2 mm-Maschensieb. Die Notwendigkeit zur Einführung einheitlicher Prüfverfahren und der Festlegung von Mindestanforderungen an die Produktqualität sowie Anforderungen an die

Zusammensetzung und Lieferung ergaben sich aus der Tatsache, dass in Deutschland zu der Zeit bereits 29 Zementwerke etwa 1 Mio. Fass Portlandzement (ca. 170 000 bis 180 000 t/a) herstellten. 1876 trat erstmals ein Ausschuss mit Vertretern der Zementwerke und des „Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement" zusammen mit dem Ziel, „*Normen* zur einheitlichen Lieferung und Prüfung von Portland-Cement" auszuarbeiten. Beratung und Verabschiedung der Norm waren gleichzeitig der Anlass für die Gründung des „Vereins Deutscher Cement-Fabrikanten" am 24. Januar 1877. Die von W. Michaëlis veröffentlichten Kriterien bildeten die Grundlage dieser Norm, die nach Überarbeitung unter Mitwirkung des Berliner Architekten-Vereins und des Vereins Berliner Bau-Interessenten 1878 durch das Land Preußen mit Ministerialerlass eingeführt wurde. Die Mindestanforderungen wurden in der verabschiedeten Norm unter anderem auf einen Siebrückstand von maximal 20 M.-% und der Mindestwert für die Zugfestigkeit des Prüfmörtels nach 28 Tagen auf 10 kg/cm^2 erhöht. Als Schiedsstelle bei Streitigkeiten zwischen öffentlichen Bauherren und Zementherstellern wurde 1880 die „Königliche Prüfstation für Baumaterialien, Berlin" durch Erlass eingesetzt.

Die steigende Qualität des Portlandzementklinkers und die Festlegung von moderaten Mindestanforderungen an die Festigkeit führten in den folgenden Jahren dazu, zur Herstellung von Portlandzement auch andere Hauptbestandteile außer Klinker einzusetzen. Wegen Schwierigkeiten bei der Beurteilung der physikalischen und chemischen Wirkung von inerten, puzzolanischen oder latent hydraulischen Zumahlstoffen aufgrund unzureichender Kenntnisse und Prüftechniken kam es 1882 nach erheblichen Auseinandersetzungen im Verein Deutscher Cement-Fabrikanten zur Festlegung eines „Reinheitsgebots" für Portlandzement. Danach durfte als Portlandzement nur ein Produkt bezeichnet werden, das

aus natürlichen Rohstoffen bis zur Sinterung gebrannt und mehlfein gemahlen wurde sowie nicht mehr als 2 M.-% an anderen Hauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, Tonschiefer oder hydraulischem Kalk, ohne Kennzeichnung, enthielt. Das „Reinheitsgebot" wurde mit großer Mehrheit beschlossen. 1886 stiegen die Anforderungen in der erstmals überarbeiteten Zementnorm auf eine Mindestzugfestigkeit von 16 kg/cm^2. Gleichzeitig wurde eine Mindestdruckfestigkeit von 160 kg/cm^2 nach 28 d, geprüft an dem gleichen Prüfmörtel, eingeführt. Zu weiteren Ergänzungen der Portlandzement-Norm kam es 1908. Im Jahr 1909 wurden der Eisenportland- und 1917 der Hochofenzement genormt.

Der Deutsche Normenausschuss (DIN), gegründet 1917, gab erstmals 1932 eine neuerlich überarbeitete Zementnorm als DIN 1164 heraus. In dieser Norm waren die Anforderungen an Portland-, Eisenportland- und Hochofenzement zusammengefasst, seit 1970 auch die an Trasszement und seit 1994 die an Ölschieferzement. Unterschiedliche Festigkeitsklassen wurden 1927 („Hochwert") und 1942 („Höchstwert") in die Norm eingeführt. Darüber hinaus gab es erstmals seit 1970 Festlegungen für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand und niedriger Hydratationswärme. Seit 1990 sind auch Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt genormt. Die verschiedenen Normenänderungen betrafen auch die Prüfverfahren. Wesentlich ist hierbei, dass für die Festigkeitsprüfung an Mörtelprismen seit 1942 plastische Mörtel mit einem w/z-Wert von 0,60 und seit 1970 – einer ISO-Empfehlung folgend – Mörtel mit stetiger Kornverteilung des Normsands und mit einem w/z-Wert von 0,50 vorgeschrieben werden. Seit 1978 ist zur Verbesserung der Kornverteilung von Zementen die Zumahlung von anorganisch-mineralischen Stoffen bis zu einem Anteil von 5 M.-% zugelassen.

Der Einführung der Zementnorm in Deutschland im Jahr 1878 folgte Frankreich im Jahr 1885. In England und den USA

gibt es seit 1909 eine Zementnorm. Mit der Einführung einer europäischen Zementnorm könnte ab 2001 gerechnet werden [Spr1, Ver1].

Zemente mit besonderen Eigenschaften

Außer den genormten Zementen wurden eine Reihe von *Zementen mit besonderen Eigenschaften* entwickelt. Der erste Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand wurde 1901 patentiert. Er ist durch einen Tonerdemodul von etwa 0,3 gekennzeichnet. Der 1919 in Italien produzierte „Ferrari-Zement" mit einem Tonerdemodul von 0,64 weist ähnliche Eigenschaften auf. Zu dieser Gruppe von Zementen zählen seit etwa 1920 die Hochofenzemente mit hohem Hüttensandgehalt. Portlandölschieferzemente mit hohem Sulfatwiderstand werden seit 1992 bzw. 1995 mit Zulassung des DIBt hergestellt.

Weißzement ist seit etwa Mitte der 80er-Jahre des vorigen Jahrhunderts bekannt. Er wurde zunächst in kleinen Mengen im Portlandzementwerk Heidelberg, später auch in anderen Werken hergestellt. Das Dyckerhoff-Werk in Amöneburg produziert seit 1931 diesen Zement in größerem Umfang. Die Eigenschaften entsprechen bis auf die Farbe denen eines normalen Portlandzements. Weißzemente sind daher nicht gesondert genormt.

Die Entwicklung und Anwendung von Tiefbohrzementen begann um 1920, die von Quellzementen nur wenig später. Quellzemente werden heute in Russland (V.V. Mikhailov, 1955), USA (A. Klein, 1958/61) und Japan (1970) hergestellt.

Von technischer Bedeutung ist auch die Entwicklung des Tonerdezements, die auf ein französisches Patent (J. Bied, 1908) zurückgeht. Der Tonerdezement wird durch Kristallisation von Schmelzen mit Monocalciumaluminat-Zusammensetzung oder durch Sintern von gleichartig zusammengesetzten Roh-

mischungen aus Kalkstein und Bauxit hergestellt. Für die Herstellung von feuerfesten Produkten sind Al_2O_3-reichere Zemente gebräuchlich. Tonerdezement wird auch als Weißzement produziert. In Deutschland wurde bei der Herstellung eines speziellen Gießereiroheisens im Hochofen eine tonerdereiche Schlacke gewonnen, die nach der Feinmahlung als „Tonerdeschmelzzement" auf denselben Gebieten Verwendung fand wie der Tonerdezement. Die seit 1925 im Hochofenwerk Lübeck betriebene Produktion wurde 1982 eingestellt. Der Tonerdezement darf in Deutschland aufgrund eines 1962 nach Bauschäden ausgesprochenen Verbots nur noch für feuerfeste Mörtel und Betone sowie schnell erhärtende Zubereitungen verwendet werden.

Technologische Entwicklung

Die maschinellen Einrichtungen entwickelten sich ab Mitte des 19. Jahrhunderts zunächst rein empirisch aus den Einrichtungen und Verfahren, die bis dahin z. B. aus der Getreidemahlung oder aus der Herstellung von Weißfeinkalk und hydraulischen Kalken sowie der Herstellung keramischer Ziegel bekannt waren. Im Jahr 1877 unterschied sich der Maschinenpark für die *Zerkleinerung* von Rohstoffen und Zementklinker nur wenig. Weiche Rohstoffe, wie Kreide und Ton, wurden nach dem Nassverfahren aufgeschlämmt und gemischt, harte Rohstoffe in Backenbrechern und nachgeschalteten Walzwerken sowie in Horizontalmahlgängen zerkleinert und anschließend nass bzw. halbnass gemischt. Kennzeichnend war die nach Abtrennung des Wassers vorgenommene Verformung des Rohschlamms wie bei der keramischen Ziegelherstellung zu Brenngutziegeln bzw. Presslingen, woraus sich der Begriff „Zementklinker" ableitet.

Ausgehend von Horizontalmahlgängen mit einer Leistung von 1 t Kalkstein/h oder 0,5 t Klinker/h setzte ab 1880 eine stürmische Entwicklung – vor allem bei den Zerkleinerungsmaschi-

nen – ein, da Mahlfeinheit und Festigkeitsentwicklung des Zements eng miteinander verknüpft sind. Die Entwicklung wurde durch die Erfindung des Stahlbetons durch J. Monier im Jahr 1878 und die hierdurch steigende Nachfrage nach Zement hoher Festigkeit gefördert. Bei steigender Mühlenleistung und abnehmendem spezifischen Energieverbrauch führte die Entwicklung weg von den Horizontalmahlgängen hin zu unterschiedlichen Typen von Wälzmühlen, Siebkugel- und Rohrmühlen. Eine lange Einkammer-Rohrmühle von 1882 wies z. B. eine Mahlleistung von 3 t Portlandzement/h bei 15 M.-% Rückstand auf dem 200 µm-Sieb auf. Daraus entwickelten sich die Verbundmühlen und mit der entscheidenden Einführung des Streuwindsichters (1889) die Umlaufmahlanlagen, die sich jedoch erst nach 1945 technisch in großem Umfang durchsetzten.

Die *Brennverfahren* zur Herstellung von Portlandzementklinker bestanden zunächst aus den von der Branntkalkherstellung bekannten, periodisch betriebenen Schachtöfen mit einer Leistung von anfangs rd. 0,5 t Klinker/d und geschätzten Energieverbrauchszahlen von 8400 bis 11 000 kJ/kg Kl. H. Bleibtreu konnte die Leistung dieses Ofentyps auf bis zu 70 t/d bei rd. 5200 kJ/kg Kl steigern. Der erste kontinuierlich betriebene Ofen war der aus der Ziegelproduktion bekannte Hoffmannsche Ringofen, der kurzzeitig mit ähnlich hohen Leistungen betrieben wurde. Wegen erschwerter Arbeitsbedingungen, auch wegen gravierender Qualitätsmängel infolge zu langsamer Kühlgeschwindigkeiten konnte sich dieses Brennverfahren nur wenige Jahre halten.

Die Entwicklung der Schachtofentechnologie führte über den bereits kontinuierlich arbeitenden Dietzschen Etagenofen (1880–1890), über den „automatischen" Schachtofen von Hauenschild (1888) und von v. Grueber (1914) hin zum Hochleistungsschachtofen von E. Spohn. Diese Ofentypen arbeiteten

mit gepressten Rohmehlformlingen, später mit Rohmehlpellets, die auf einem Granulierteller erzeugt wurden. Die Granuliertechnik ermöglichte die Einmischung von Brennstoffstaub in die Pellets (Schwarzmehl- (1938), Schalenverfahren (1950–1960)) und dadurch bedingt eine Leistungssteigerung bis auf 300 t Klinker/d und einen thermischen Energieverbrauch von weniger als 3500 kJ/kg Kl.

Entscheidend für den heute erreichten Stand der Brenntechnik war jedoch die Entwicklung der Brennverfahren im Drehrohrofen, der als Konkurrenz zum Schachtofen erst ab 1895 in Erscheinung trat. Der erste, nach dem Trockenverfahren arbeitende Drehrohrofen soll 1895 bei der Firma Atlas Cement Co. in den USA (PA) erprobt worden sein. Den ersten Versuchsdrehofen baute K.O. Forell 1896 in Deutschland. Mit einer Länge von 16 m erreichte er eine Tagesproduktion von rd. 35 tKl aus einem Brenngutgemisch von Hochofenschlacken- und Kalksteinmehl und Steinkohlenstaub als Brennstoff. Der erste größere Produktionsofen ging 1899 im Zementwerk Hannover in Betrieb (L = 30 m, D = 2 m) mit einer Leistung von etwa 80 bis 100 t/d. Kennzeichnend für die Konstruktion war ein gegenläufiger Rohrkühler, dessen Abluft bereits als sekundäre Verbrennungsluft genutzt wurde. Die Entwicklung der Drehofentechnologie verlief so stürmisch, dass ab etwa 1905 viele Neuanlagen nur noch mit Drehrohrofen ausgestattet wurden, die nach dem Nassverfahren und nach dem Trockenverfahren ohne Vorwärmer arbeiteten.

Zur Verringerung des thermischen Energieverbrauchs wurden die nach dem Nassverfahren arbeitenden Drehöfen verlängert oder zur besseren Nutzung der Abgaswärme mit Calcinatoren, Konzentratoren oder Schlammtrocknern ausgestattet. Die Energiebilanz von Trockenöfen verbesserte sich bei der Abwärmenutzung zur Rohmaterialtrocknung oder durch Einbau von

Abhitzekesseln zur Dampf- und Stromerzeugung. Hierdurch ließ sich bereits der Energieverbrauch auf 3600 bis 6700 kJ/kg Kl gegenüber 5000 bis 7500 kJ/kg Kl bei Nassöfen senken.

Der nächste große Schritt in der Entwicklung des Ofenbaus bestand in der Erfindung des Rostvorwärmers durch O. Lellep (Polysius). Der mit Rohmehlpellets beschickte Vorwärmer war anfangs für einfache, ab 1952 für doppelte Gasführung konstruiert. Das Halbnassverfahren erreichte in der Endstufe der Entwicklung zwischen 1980 und 1990 eine Leistung von rd. 3200 t Kl/d bei 3400 kJ/kg Kl.

Als zweite, noch erfolgreichere Weiterentwicklung des Trockenverfahrens hat sich das von M. Vogel-Jörgensen erfundene und 1951 von F. Müller (KHD) zur industriellen Reife entwickelte Zyklonvorwärmerverfahren erwiesen. Der heute aus vier bis sechs Stufen bestehende Zyklonvorwärmer erwärmt das frische Brenngut im Gegenstrom zum Ofenabgas. Der bei Mahltrocknungs- oder im Direktbetrieb erzielbare thermische Energiebedarf sank bei Ofenleistungen ohne Vorcalcination bis 4000 t Kl/d und in mit Vorcalcinator ausgestatteten Anlagen bis 10 000 t Kl/d auf Werte von unter 3000 kJ/kg Kl. Die heutige Klinkerproduktion ist in Deutschland nahezu ausschließlich auf Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer, teilweise auch mit Calcinator, umgestellt [Sil1].

Organisation der Zementindustrie

Am 24. Januar 1877 schlossen sich 23 Zementwerke im Anschluss an eine Sitzung des „Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement" zum „Verein Deutscher Cement-Fabrikanten" zusammen. Ihr Hauptinteresse galt zunächst der Schaffung einer Zementnorm mit der Festlegung von Mindestanforderungen an die Produkteigenschaften

einschließlich der Zementzusammensetzung sowie von einheitlichen Lieferbedingungen. Der Zusammenschluss wurde 1889 nach internen Auseinandersetzungen über die Frage der Verwendung anderer Hauptbestandteile außer Klinker im Zement in „Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten" umbenannt. Die zehn ausgeschlossenen Hersteller von Eisenportlandzement gründeten 1902 und die Hochofenzementhersteller 1913 eigene technisch-wissenschaftliche Vereinigungen. Alle drei Zementvereine unterhielten getrennt arbeitende Laboratorien. Das Laboratorium der Portlandzementwerke nahm 1902 in Berlin-Karlshorst seinen Betrieb auf. Erster Leiter war W. Leobell. Hauptaufgaben waren zunächst die Güteüberwachung, die Weiterentwicklung der Zementnorm und der Prüfverfahren. Später kam die Untersuchung der Klinkereigenschaften in Abhängigkeit vom Brenn- und Kühlverfahren hinzu und deren Auswirkung auf die Zementeigenschaften. 1911 wurde die „Centralstelle zur Förderung der Deutschen Portlandzement-Industrie", eine stärker wirtschaftspolitisch orientierte Einrichtung und damit Vorläufer des BDZ, gegründet und aus dem Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten abgetrennt. Die beiden Vereine der Hüttenzementindustrie ließen zunächst die Zemente ihrer Mitgliedswerke in der chemisch-technischen Versuchsstation von Hermann Passow, Hamburg, überwachen, der sich auch mit Hüttensandforschung beschäftigte. Der Verein Deutscher Eisenportlandzementhersteller gründete dann jedoch im Jahr 1912 sein eigenes Laboratorium, dessen erster Leiter A. Guttmann war. Das Laboratorium des Vereins Deutscher Hochofenzementwerke, dessen Leitung R. Grün nach dem Tod von H. Passow übernahm, wurde 1922 nach Düsseldorf verlagert und zunächst in einem Gebäude in der Tannenstraße mit dem Laboratorium des Vereins Deutscher Eisenportlandzementhersteller zu einem „Forschungsinstitut der Hütten-

zementindustrie Düsseldorf" zusammengeführt. 1926 wurde das Laboratorium des Vereins Deutscher Eisenportlandzementhersteller in ein Gebäude in der Düsseldorfer Eckstraße verlegt. Die Laboratorien behielten eine getrennte Leitung, R. Grün war für die Hochofenzemente, A. Guttmann, später F. Keil für die Eisenportlandzemente zuständig. Erst im Jahr 1941 näherten sich die drei Vereine wieder einander an und schlossen sich zu einer Arbeitsgemeinschaft zusammen, aus der 1948 der Verein Deutscher Portland- und Hüttenzementwerke hervorging. 1952 wurde diese technisch-wissenschaftliche Vereinigung in „Verein Deutscher Zementwerke" umbenannt, die das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf betreibt [Loc1, Hae1]. Zur Entwicklung der Anwendung von Zement in Mörtel und Beton s. Abschnitte II.1.2 und II.2.1.

2 Zementarten

2.1 Normung

Für die derzeit gültige Fassung der *Zementnorm* DIN 1164 von Oktober 1994 wurde die Ausgabe von 1970 in zwei wesentlichen Punkten verändert. Zum einen waren die Vorarbeiten für eine europäische Zementnorm so weit fortgeschritten, dass eine Anpassung der nationalen Regelungen sinnvoll erschien. Darüber hinaus konnte eine Reihe von Zementen mit bauaufsichtlicher Zulassung, die sich bewährt hatten und die inzwischen im Markt eingeführt waren, in das Normenwerk aufgenommen werden. Zudem wurde Portlandölschieferzement, der zuvor durch einen eigenen Normteil erfasst war, in die Hauptnorm übernommen.

Die DIN 1164-1 (1994) umfasst insgesamt zwölf *Zementarten*, die in der aus der künftigen europäischen Zementnorm prEN 197-1 stammenden **Tafel I.2.1-1** schattiert gekennzeichnet sind. Mit dieser Auswahl wurde zwar die Zahl der ursprünglich in DIN 1164 genormten Zementarten von fünf auf zwölf erweitert, trotzdem aber der nach wie vor gültige Grundsatz aufrecht erhalten, wonach in eine deutsche Zementnorm nur solche Zemente aufgenommen werden können, die unter den in Deutschland vorherrschenden Klima- und Anwendungsbedingungen unter dem Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit vergleichbare Merkmale aufweisen. Unabhängig von dieser wesentlichen Einschränkung bei Art und Anzahl der genormten Zemente wurden aber in die derzeit gültige DIN 1164-1, fast ohne weitere Ausnahme, die in der zukünftigen harmonisierten europäischen Norm für Normalzemente (Common Cements) DIN EN 197-1

Tafel I.2.1-1: Zementarten und Zusammensetzung nach prEN 197-1; in DIN 1164-1 (1994) genormte Zementarten sind schattiert gekennzeichnet

Hauptart	Bezeichnung	Kurzzeichen
CEM I	Portlandzement	CEM I
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S CEM II/B-S
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T CEM II/B-T
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L CEM II/A-LL[1)] CEM II/B-L CEM II/B-LL
	Portlandkompositzement	CEM II/A-M CEM II/B-M[2)]
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A CEM III/B CEM III/C
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A CEM IV/B
CEM V	Kompositzement	CEM V/A CEM V/B

[1)] Entspricht dem CEM II/A-L Portlandkalksteinzement der Zementnorm DIN 1164-1 (1994) mit einem TOC-Gehalt im Kalkstein von $\leq$ 0,20 M.-%.

[2)] In der Zementnorm DIN 1164-1 (1994) ist nur der CEM II/B-SV Portlandflugaschehüttenzement erfasst.

vorgesehenen Regelungen übernommen. Das gilt sowohl für den formalen Aufbau als auch für die Festlegung der Festigkeitsklassen und der Zementbezeichnungen. Damit konnte der europäischen Konsensfindung Rechnung getragen werden, die die Aussichten auf eine Annahme der europäischen Zementnorm in der Gemeinschaft deutlich verbessert hat. Für den mengenmäßig überwiegenden Teil der in Europa hergestellten Zemente werden künftig gleiche Anforderungen und Bezeichnungen gelten. Ein von allen Ländern der Gemeinschaft getragenes Konzept zur Normung der restlichen Zemente, insbesondere der Zemente mit besonderen Eigenschaften, dürfte noch geraume Zeit in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund werden solche Zemente und Zementarten in absehbarer Zeit auch weiterhin national genormt bleiben.

2.2 Zementarten

Die derzeit gültige Zementnorm DIN 1164-1 umfasst zwölf Zementarten, die entsprechend der europäischen Klassifikation den drei Hauptarten

CEM I: Portlandzemente
CEM II: Portlandkompositzemente
CEM III: Hochofenzemente

zugeordnet sind. **Tafel I.2.2-1** gibt die Zementarten, ihre Bezeichnung und die Anforderungen an die Zusammensetzung wieder.

Portlandzement (CEM I), unter der gleichen Bezeichnung seit 1878 in Deutschland genormt, enthält als *Hauptbestandteil* ausschließlich Portlandzementklinker. Darüber hinaus darf dieser Zement, wie auch die anderen Normzemente, höchstens 5 M.-% *Nebenbestandteile* enthalten. Dabei handelt es sich um besonders ausgewählte anorganische mineralische Stoffe, die

Tafel I.2.2-1: Zementarten und deren Zusammensetzung nach DIN 1164-1 (Fassung Okt. 1994); alle Angaben in M.-%

Zementart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile	
			Portlandzementklinker	Hüttensand
			K	S
CEM I	Portlandzement	CEM I	95–100	–
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80–94	6–20
		CEM II/B-S	65–79	21–35
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	80–94	–
		CEM II/B-P	65–79	–
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	80–94	–
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T	80–94	–
		CEM II/B-T	65–79	–
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80–94	–
	Portlandflugaschehüttenzement	CEM II/B-SV	65–79	10–20
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35–64	36–65
		CEM III/B	20–34	66–80

[1] Nebenbestandteile können Füller sein oder ein oder mehrere Hauptbestandteile, soweit sie nicht Hauptbestandteile des Zements sind.

vorgesehenen Regelungen übernommen. Das gilt sowohl für den formalen Aufbau als auch für die Festlegung der Festigkeitsklassen und der Zementbezeichnungen. Damit konnte der europäischen Konsensfindung Rechnung getragen werden, die die Aussichten auf eine Annahme der europäischen Zementnorm in der Gemeinschaft deutlich verbessert hat. Für den mengenmäßig überwiegenden Teil der in Europa hergestellten Zemente werden künftig gleiche Anforderungen und Bezeichnungen gelten. Ein von allen Ländern der Gemeinschaft getragenes Konzept zur Normung der restlichen Zemente, insbesondere der Zemente mit besonderen Eigenschaften, dürfte noch geraume Zeit in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund werden solche Zemente und Zementarten in absehbarer Zeit auch weiterhin national genormt bleiben.

2.2 Zementarten

Die derzeit gültige Zementnorm DIN 1164-1 umfasst zwölf Zementarten, die entsprechend der europäischen Klassifikation den drei Hauptarten

CEM I: Portlandzemente
CEM II: Portlandkompositzemente
CEM III: Hochofenzemente

zugeordnet sind. **Tafel I.2.2-1** gibt die Zementarten, ihre Bezeichnung und die Anforderungen an die Zusammensetzung wieder.

Portlandzement (CEM I), unter der gleichen Bezeichnung seit 1878 in Deutschland genormt, enthält als *Hauptbestandteil* ausschließlich Portlandzementklinker. Darüber hinaus darf dieser Zement, wie auch die anderen Normzemente, höchstens 5 M.-% *Nebenbestandteile* enthalten. Dabei handelt es sich um besonders ausgewählte anorganische mineralische Stoffe, die

Tafel I.2.2-1: Zementarten und deren Zusammensetzung nach DIN 1164-1 (Fassung Okt. 1994); alle Angaben in M.-%

Zementart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile	
			Portlandzementklinker	Hüttensand
			K	S
CEM I	Portlandzement	CEM I	95–100	–
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80–94	6–20
		CEM II/B-S	65–79	21–35
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	80–94	–
		CEM II/B-P	65–79	–
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	80–94	–
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T	80–94	–
		CEM II/B-T	65–79	–
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80–94	–
	Portlandflugaschehüttenzement	CEM II/B-SV	65–79	10–20
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35–64	36–65
		CEM III/B	20–34	66–80

[1] Nebenbestandteile können Füller sein oder ein oder mehrere Hauptbestandteile, soweit sie nicht Hauptbestandteile des Zements sind.

Hauptbestandteile				Nebenbestandteile[1)]
natürl. Puzzolan	kieselsäurereiche Flugasche	gebrannter Ölschiefer	Kalkstein	
P	V	T	L	
–	–	–	–	0–5
–	–	–	–	0–5
–	–	–	–	0–5
6–20	–	–	–	0–5
21–35	–	–	–	0–5
–	6–20	–	–	0–5
–	–	6–20	–	0–5
–	–	21–35	–	0–5
–	–	–	6–20	0–5
–	10–20	–	–	0–5
–	–	–	–	0–5
–	–	–	–	0–5

bei der Klinkerherstellung entstehen oder hierfür als Ausgangsstoff eingesetzt werden. Stoffe, die bereits als Hauptbestandteil verwendet werden, dürfen nicht als Nebenbestandteil eingesetzt werden. Nach der künftigen europäischen Zementnorm prEN 197-1 beschränkt sich die Auswahl von Nebenbestandteilen zudem auf Stoffe natürlichen Ursprungs. Nebenbestandteile dienen der Verbesserung der Kornverteilung, insbesondere von konventionell gemahlenen Zementen geringerer Mahlfeinheit, und damit der Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften und des Wasserrückhaltevermögens.

Die in DIN 1164 genormten *Portlandkompositzemente* (CEM II) bestehen aus mehreren Hauptbestandteilen. Der Anteil der Bestandteile außer Klinker darf generell 6 bis 35 M.-%, beim *Portlandkalksteinzement* und beim *Portlandflugaschezement* aus Gründen der Dauerhaftigkeit jedoch nur 6 bis 20 M.-% betragen.

Die Kurzbezeichnung der Zementarten entspricht mit einer Ausnahme der der europäischen Zementnorm, wobei die Kennbuchstaben auf folgenden Festlegungen beruhen:

K für Portlandzement**k**linker
S für Hüttensand (granulated blast furnace **s**lag)
P für natürliches **P**uzzolan (z. B. Trass)
T für gebrannten (Öl)-Schiefer (burn**t** shale)
V für kieselsäurereiche Flugasche (cendre **v**olantes)
L für Kalkstein (**L**imestone)

Abweichend von der Bezeichnung für Portlandkalksteinzement CEM II/A-L in DIN 1164-1 wird dieser Zement künftig die Bezeichnung CEM II/A-LL tragen. Die Änderung ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund einer europäischen Kompromissregelung der zur Herstellung dieser Zementart geeignete Kalkstein zwei Konzentrationsbereiche für den TOC-Gehalt aufweisen kann. Kalkstein mit TOC-Gehalten von 0 bis 0,2 M.-% trägt die Bezeichnung LL, im Kalkstein mit der Bezeichnung L darf

der TOC-Gehalt einen Wert von 0,5 M.-% nicht überschreiten. Zur Herstellung von Portlandkalksteinzement darf in Deutschland ausschließlich der Kalkstein mit maximal 0,2 M.-% TOC (LL) verwendet werden.

Portlandölschieferzemente nach DIN 1164 (1994) enthalten 6 bis 20 M.-% bzw. 21 bis 35 M.-% gebrannten Ölschiefer (nach prEN 197-1 als „Gebrannter Schiefer" bezeichnet). *Ölschiefer* ist ein weltweit vorkommendes Sedimentgestein, das etwa 5 bis 60 M.-% organische Substanz enthält. Die anorganische Substanz besteht im Wesentlichen aus Tonmineralen, Quarz, Feldspat, Calciumcarbonat und -sulfat. Ölschiefer wird zur Gewinnung von Dampf und elektrischer Energie u. a. in Wirbelschichtöfen bei ca. 800 °C verbrannt. Gebrannter Ölschiefer mit überwiegend toniger Matrix weist puzzolanische, bei CaO-Gehalten von über 20 M.-% auch hydraulische Eigenschaften auf, die auf die Bildung von Calciumaluminat und Dicalciumsilicat zurückzuführen sind. Gebrannter Ölschiefer zur Herstellung von Portlandölschieferzement nach DIN 1164 bzw. prEN 197-1 muss als Bindemittel ohne Klinkerzusatz im Normenmörtel eine Mindestdruckfestigkeit von 25 N/mm² nach 28 d erreichen. Ein Zusatz von Calciumsulfat zur Verzögerung des Erstarrens ist, abhängig vom Anteil des gebrannten Ölschiefers im Zement, nur erforderlich, wenn die Eigenmenge an Sulfat nicht ausreicht. Die Brennfarbe des Ölschiefers ist zementgrau nach reduzierendem und rotbraun nach oxidierendem Brand und prägt hierdurch die Farbe des Zements.

Die *Hochofenzemente* der DIN 1164-1 entsprechen den bis 1994 gültigen Festlegungen mit der Erweiterung, dass nunmehr bei dieser Zementart zwischen Hochofenzement mit mittlerem (CEM III/A) und hohem Hüttensandgehalt (CEM III/B) unterschieden wird und die Grenze bei 65 M.-% liegt.

Tafel I.2.2-2: Zementarten und Festigkeitsklassen – prozentuale Anteile am Inlandversand 1998 (BDZ)

Zementarten			
		32,5	32,5 R
Portlandzement	CEM I	0,3	35,1
Portlandhüttenzement	CEM II/A,B-S	–	7,6
Portlandpuzzolanzement	CEM II/A,B-P	0,1	0,1
Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	–	–
Portlandölschieferzement	CEM II/A,B-T	–	–
Portlandkalksteinzement	CEM II/A-LL	–	4,5
Portlandflugaschehütten-zement	CEM II/B-SV	–	–
Hochofenzement	CEM III/A,B	11,6	0,5
sonstige Zemente	–	–	–
Summe		**12,0**	**47,8**

Mit der Angleichung der DIN 1164-1 an die kommende europäische Norm ist die Zahl der Zemente mit bauaufsichtlicher Zulassung deutlich vermindert worden. Weiterhin der Zulassung unterworfen bleiben Portlandpuzzolanzemente mit einem Trassgehalt von über 35 M.-%, Trasshochofenzemente oder Zemente mit Gehalten an Hauptbestandteilen außerhalb der Festlegungen in Tafel I.2.2-1, wie z. B. der Hochofenzement CEM III/C.

Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern übersteigt in Deutschland der Anteil des Portlandzements am Inlandversand den der anderen Zementarten deutlich. Der heutige Anteil der Zementarten und Festigkeitsklassen geht aus **Tafel I.2.2-2** hervor. Der Inlandversand betrug 1998 rd. 32,0 Mio. t.

Festigkeitsklassen				Gesamt
42,5	42,5 R	52,5	52,5 R	%
1,4	26,2	0,6	4,7	68,3
0,6	2,3	–	0,2	10,7
0,1	–	–	–	0,3
–	–	–	–	0,0
1,0	0,2	–	–	1,2
–	0,2	–	–	4,7
–	–	–	–	0,0
1,9	0,1	–	–	14,1
–	–	–	–	0,7
5,0	**29,0**	**0,6**	**4,9**	**100,0**

Die nach DIN 1164 geltenden Anforderungen an die Hauptbestandteile des Zements gehen aus Abschnitt I.3.1.2, die zu beachtenden Anforderungen an die Arbeitssicherheit bei der Zementherstellung und an den gebräuchlichen Umgang mit Zement aus Abschnitt I.3.4 hervor.

Zemente benötigen den Zusatz bzw. die Zumahlung von Calciumsulfaten zur Regelung des Erstarrens und der Festigkeitsentwicklung. Die Zusatzmenge ist für die unterschiedlichen Zementarten durch die Festlegungen der Norm begrenzt. In der Gesamtsumme ist der Sulfatgehalt des Klinkers zu berücksichtigen. Je nach hydraulischer Reaktivität des Tricalciumaluminatanteils im Klinker hat es sich als zweckmäßig erwie-

sen, unterschiedliche Arten von Sulfatträgern wie Gipsstein ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), beim Mahlen durch Entwässerung entstandenes Halbhydrat ($CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O$) oder löslichen Anhydrit ($CaSO_4$ III) sowie natürlichen Anhydrit ($CaSO_4$ II) zu verwenden und deren Zusatz nach Art und Mengenanteil so einzustellen, dass der Wasseranspruch ein Minimum und die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn ein Maximum aufweisen („Optimierung"). Bei Hochofenzementen ist die sulfatische Anregung des Hüttensands zu berücksichtigen. Außerdem gestattet die Norm auch die Verwendung von Sulfatträgern aus anderen industriellen Prozessen, wie z. B. der Rauchgasentschwefelung (REA) [Spr1].

Außer den Haupt- und Nebenbestandteilen können Normzemente Zusatzstoffe enthalten. Ihr Anteil ist außer bei Zusatz von Pigmenten auf 1 M.-% begrenzt. Zusätze dienen der Energieeinsparung beim Mahlprozess, wie z. B. Mahlhilfsmittel, aber auch der Verbesserung der Fließ- und Lagerfähigkeit von Zement im Silo. Die Zusatzmenge beträgt im Allgemeinen weniger als 0,05 M.-%. Nach der neuen europäischen Zementnorm darf der Zusatz von organischen Stoffen einen Wert von 0,5 M.-% nicht überschreiten. Generell wird zudem gefordert, dass Zusätze weder den Korrosionsschutz der Bewehrung, noch die Gebrauchseigenschaften von Zement und Beton beeinträchtigen. Bei Verwendung von Zusatzmitteln nach EN 934 muss die Art des eingesetzten Stoffes angegeben werden.

2.3 Qualitätssicherung

Qualitätssicherung und -überwachung haben eine Tradition, die ähnlich wie der Normungsgedanke auf die Jahre 1877/78 zurückgeht. Das heute geltende System der Qualitätssicherung

Tafel I.2.2-3: Vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführende Zementprüfungen gemäß DIN 1164-2

Eigenschaft	Zemente	Prüfverfahren	Prüfhäufigkeit
Anfangs-, Normfestigkeit	alle	DIN EN 196-1	2/Woche
Erstarrungszeiten	alle	DIN EN 196-3	2/Woche
Sulfatgehalt	alle	DIN EN 196-2	2/Woche
Dehnungsmaß (Raumbeständigkeit)	alle	DIN EN 196-3	1/Woche
Chloridgehalt	alle	DIN EN 196-21	2/Monat[2)]
Glühverlust	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2	2/Monat[2)]
unlöslicher Rückstand	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2: Abs. 9	2/Monat[2)]
Hydratationswärme	NW	DIN 1164-8	1/Monat
Zusammensetzung für hohen Sulfatwiderstand	HS	DIN EN 196-2[1)]	1/Monat
Zusammensetzung für niedrigen wirksamen Alkaligehalt	NA	DIN EN 196-21[1)]	2/Woche
Zusammensetzung	alle	[1)]	1/Monat

[1)] Geeignete Prüfverfahren für die Bestimmung des Anteils der Zementbestandteile.

[2)] Wenn keines der Prüfergebnisse 50% des charakteristischen Wertes übersteigt, darf die Prüfhäufigkeit auf 1/Monat verringert werden.

ist im Teil 2 der DIN 1164 festgelegt und folgt wie im Fall der Produktnorm weitgehend den Vorgaben europäischer Regelungen. Die Beurteilung der Übereinstimmung mit den Normanforderungen beruht auf der Prüfung des versandbereiten Zements im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle sowie durch eine Fremdüberwachung durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle. **Tafel I.2.2-3** zeigt die nach DIN 1164 vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführenden Prüfungen. Das von Bauaufsicht und Zementverwendern gleichermaßen anerkannte System hat insgesamt zu einem hohen Qualitätsniveau sowie insbesondere zu einer hohen Gleichmäßigkeit der Produktion beigetragen. Wesentlich unterstützt wird diese Entwicklung neuerdings durch unternehmensbezogene Qualitätsmanagementsysteme (s. Abschnitt I.3.2.4), die privatrechtlich zertifiziert sind. Auf Fragen der werkseigenen Produktionskontrolle und der Qualitätssicherung im Betonbau wird in Abschnitt II.17 näher eingegangen.

2.4 Zemente mit besonderen Eigenschaften

Für Zemente mit *Sondereigenschaften* gibt es noch keine europäischen Normen. Aus diesem Grund enthält die deutsche Zementnorm DIN 1164-1 entsprechende Regelungen für *hohen Sulfatwiderstand* (HS), *niedrige Hydratationswärme* (NW) und niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA). Die Anforderungen gehen aus **Tafel I.2.2-4** hervor.

Die Anforderungen an Zemente mit besonderen Eigenschaften werden auch in dem Fall in der DIN 1164 fortgeschrieben, wenn für Zemente mit normalen Eigenschaften (Common Cements) die Regelungen der künftigen europäischen Zementnorm prEN 197-1 national umgesetzt werden müssen. DIN 1164-1 erhält dann den Status einer „Ergänzungsnorm". Die bereits getroffenen Festlegungen für NA-Zemente wurden auf weitere

Tafel I.2.2-3: Vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführende Zementprüfungen gemäß DIN 1164-2

Eigenschaft	Zemente	Prüfverfahren	Prüfhäufigkeit
Anfangs-, Normfestigkeit	alle	DIN EN 196-1	2/Woche
Erstarrungszeiten	alle	DIN EN 196-3	2/Woche
Sulfatgehalt	alle	DIN EN 196-2	2/Woche
Dehnungsmaß (Raumbeständigkeit)	alle	DIN EN 196-3	1/Woche
Chloridgehalt	alle	DIN EN 196-21	2/Monat[2)]
Glühverlust	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2	2/Monat[2)]
unlöslicher Rückstand	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2: Abs. 9	2/Monat[2)]
Hydratationswärme	NW	DIN 1164-8	1/Monat
Zusammensetzung für hohen Sulfatwiderstand	HS	DIN EN 196-2[1)]	1/Monat
Zusammensetzung für niedrigen wirksamen Alkaligehalt	NA	DIN EN 196-21[1)]	2/Woche
Zusammensetzung	alle	[1)]	1/Monat

[1)] Geeignete Prüfverfahren für die Bestimmung des Anteils der Zementbestandteile.

[2)] Wenn keines der Prüfergebnisse 50% des charakteristischen Wertes übersteigt, darf die Prüfhäufigkeit auf 1/Monat verringert werden.

ist im Teil 2 der DIN 1164 festgelegt und folgt wie im Fall der Produktnorm weitgehend den Vorgaben europäischer Regelungen. Die Beurteilung der Übereinstimmung mit den Normanforderungen beruht auf der Prüfung des versandbereiten Zements im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle sowie durch eine Fremdüberwachung durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle. **Tafel I.2.2-3** zeigt die nach DIN 1164 vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführenden Prüfungen. Das von Bauaufsicht und Zementverwendern gleichermaßen anerkannte System hat insgesamt zu einem hohen Qualitätsniveau sowie insbesondere zu einer hohen Gleichmäßigkeit der Produktion beigetragen. Wesentlich unterstützt wird diese Entwicklung neuerdings durch unternehmensbezogene Qualitätsmanagementsysteme (s. Abschnitt I.3.2.4), die privatrechtlich zertifiziert sind. Auf Fragen der werkseigenen Produktionskontrolle und der Qualitätssicherung im Betonbau wird in Abschnitt II.17 näher eingegangen.

2.4 Zemente mit besonderen Eigenschaften

Für Zemente mit *Sondereigenschaften* gibt es noch keine europäischen Normen. Aus diesem Grund enthält die deutsche Zementnorm DIN 1164-1 entsprechende Regelungen für *hohen Sulfatwiderstand* (HS), *niedrige Hydratationswärme* (NW) und niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA). Die Anforderungen gehen aus **Tafel I.2.2-4** hervor.

Die Anforderungen an Zemente mit besonderen Eigenschaften werden auch in dem Fall in der DIN 1164 fortgeschrieben, wenn für Zemente mit normalen Eigenschaften (Common Cements) die Regelungen der künftigen europäischen Zementnorm prEN 197-1 national umgesetzt werden müssen. DIN 1164-1 erhält dann den Status einer „Ergänzungsnorm". Die bereits getroffenen Festlegungen für NA-Zemente wurden auf weitere

Tafel I.2.2-3: Vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführende Zementprüfungen gemäß DIN 1164-2

Eigenschaft	Zemente	Prüfverfahren	Prüfhäufigkeit
Anfangs-, Normfestigkeit	alle	DIN EN 196-1	2/Woche
Erstarrungszeiten	alle	DIN EN 196-3	2/Woche
Sulfatgehalt	alle	DIN EN 196-2	2/Woche
Dehnungsmaß (Raumbeständigkeit)	alle	DIN EN 196-3	1/Woche
Chloridgehalt	alle	DIN EN 196-21	2/Monat[2)]
Glühverlust	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2	2/Monat[2)]
unlöslicher Rückstand	CEM I, CEM III	DIN EN 196-2: Abs. 9	2/Monat[2)]
Hydratationswärme	NW	DIN 1164-8	1/Monat
Zusammensetzung für hohen Sulfatwiderstand	HS	DIN EN 196-2[1)]	1/Monat
Zusammensetzung für niedrigen wirksamen Alkaligehalt	NA	DIN EN 196-21[1)]	2/Woche
Zusammensetzung	alle	[1)]	1/Monat

[1)] Geeignete Prüfverfahren für die Bestimmung des Anteils der Zementbestandteile.

[2)] Wenn keines der Prüfergebnisse 50% des charakteristischen Wertes übersteigt, darf die Prüfhäufigkeit auf 1/Monat verringert werden.

ist im Teil 2 der DIN 1164 festgelegt und folgt wie im Fall der Produktnorm weitgehend den Vorgaben europäischer Regelungen. Die Beurteilung der Übereinstimmung mit den Normanforderungen beruht auf der Prüfung des versandbereiten Zements im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle sowie durch eine Fremdüberwachung durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle. **Tafel I.2.2-3** zeigt die nach DIN 1164 vom Hersteller am versandbereiten Zement durchzuführenden Prüfungen. Das von Bauaufsicht und Zementverwendern gleichermaßen anerkannte System hat insgesamt zu einem hohen Qualitätsniveau sowie insbesondere zu einer hohen Gleichmäßigkeit der Produktion beigetragen. Wesentlich unterstützt wird diese Entwicklung neuerdings durch unternehmensbezogene Qualitätsmanagementsysteme (s. Abschnitt I.3.2.4), die privatrechtlich zertifiziert sind. Auf Fragen der werkseigenen Produktionskontrolle und der Qualitätssicherung im Betonbau wird in Abschnitt II.17 näher eingegangen.

2.4 Zemente mit besonderen Eigenschaften

Für Zemente mit *Sondereigenschaften* gibt es noch keine europäischen Normen. Aus diesem Grund enthält die deutsche Zementnorm DIN 1164-1 entsprechende Regelungen für *hohen Sulfatwiderstand* (HS), *niedrige Hydratationswärme* (NW) und niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA). Die Anforderungen gehen aus **Tafel I.2.2-4** hervor.

Die Anforderungen an Zemente mit besonderen Eigenschaften werden auch in dem Fall in der DIN 1164 fortgeschrieben, wenn für Zemente mit normalen Eigenschaften (Common Cements) die Regelungen der künftigen europäischen Zementnorm prEN 197-1 national umgesetzt werden müssen. DIN 1164-1 erhält dann den Status einer „Ergänzungsnorm". Die bereits getroffenen Festlegungen für NA-Zemente wurden auf weitere

Tafel I.2.2-4: Anforderungen an Zemente mit Sondereigenschaften nach DIN 1164-1

Zement	Eigenschaft	Zementart	Anforderung
NW	Hydratationswärme	alle	≤270 J/g
HS	C_3A-Gehalt	CEM I	≤3,00 M.-%
	Al_2O_3-Gehalt		≤5,00 M.-%
	Hüttensandgehalt	CEM III/B	≥66,0 M.-%
NA	Na_2O-Äquivalent	alle	≤0,60 M.-%
		CEM II/B-S	≤0,70 M.-%
		CEM III/A[1)]	≤1,10 M.-%
		CEM III/A[2)]	≤0,95 M.-%
		CEM III/B	≤2,00 M.-%

[1)] Nur wenn der Zement mindestens 50 M.-% Hüttensand enthält.
[2)] Nur wenn der Zement weniger als 49 M.-% Hüttensand enthält.

Zementarten erweitert. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zahl der ursprünglich genormten Zemente erweitert werden konnte. Alle Zemente mit Sondereigenschaften sind in Tafel I.2.2-4 zusammengestellt. Die Zahl der Zemente mit NA-Eigenschaft wurde um die Normzemente CEM II/B-S (>21 M.-% Hüttensand, ≤0,70 M.-% Na_2O-Äquivalent) und CEM III/A (≤49 M.-% Hüttensand, ≤0,95 M.-% Na_2O-Äquivalent) sowie um den bauaufsichtlich zugelassenen Zement CEM III/B (≤2,00 M.-% Na_2O-Äquivalent) ergänzt.

Außer den Zementen mit normalen und besonderen Eigenschaften wird für besondere Zwecke noch eine Reihe weiterer Zemente hergestellt und angewendet:

Weißzement:	Genormt als Portlandzement CEM I in DIN 1164-1
Hydrophobierter Zement:	Genormt als Portlandzement CEM I in DIN 1164-1
Tonerdezement:	In Deutschland nicht genormt und nicht zugelassen für tragende Bauteile aus Beton. Ein europäischer Normentwurf wird derzeit bearbeitet
Tiefbohrzement:	Nicht genormter Zement unterschiedlicher Zusammensetzung für die Auskleidung von Bohrlöchern, z. B. bei der Erdöl- und Ergasgewinnung, Herstellung und Prüfung nach API-Standards (American Petroleum Institute)
Schnellzement:	Zemente auf der Basis von Portlandzement mit erhöhten Gehalten an Calciumaluminaten und durch Zusätze gesteuertem Erstarrungsverhalten, mit bauaufsichtlicher Zulassung
Spritzbetonzement:	Zemente auf der Basis von Portlandzement mit unterschiedlichen Zusätzen zur Steuerung des Erhärtens, mit bauaufsichtlicher Zulassung
Quellzement:	In Deutschland nicht genormte Zemente mit erhöhtem Aluminat- und Sulfatgehalt zur Steuerung des Quellverhaltens, teilweise mit bauaufsichtlicher Zulassung

Errata zum Zement-Taschenbuch 2000

Seite 34

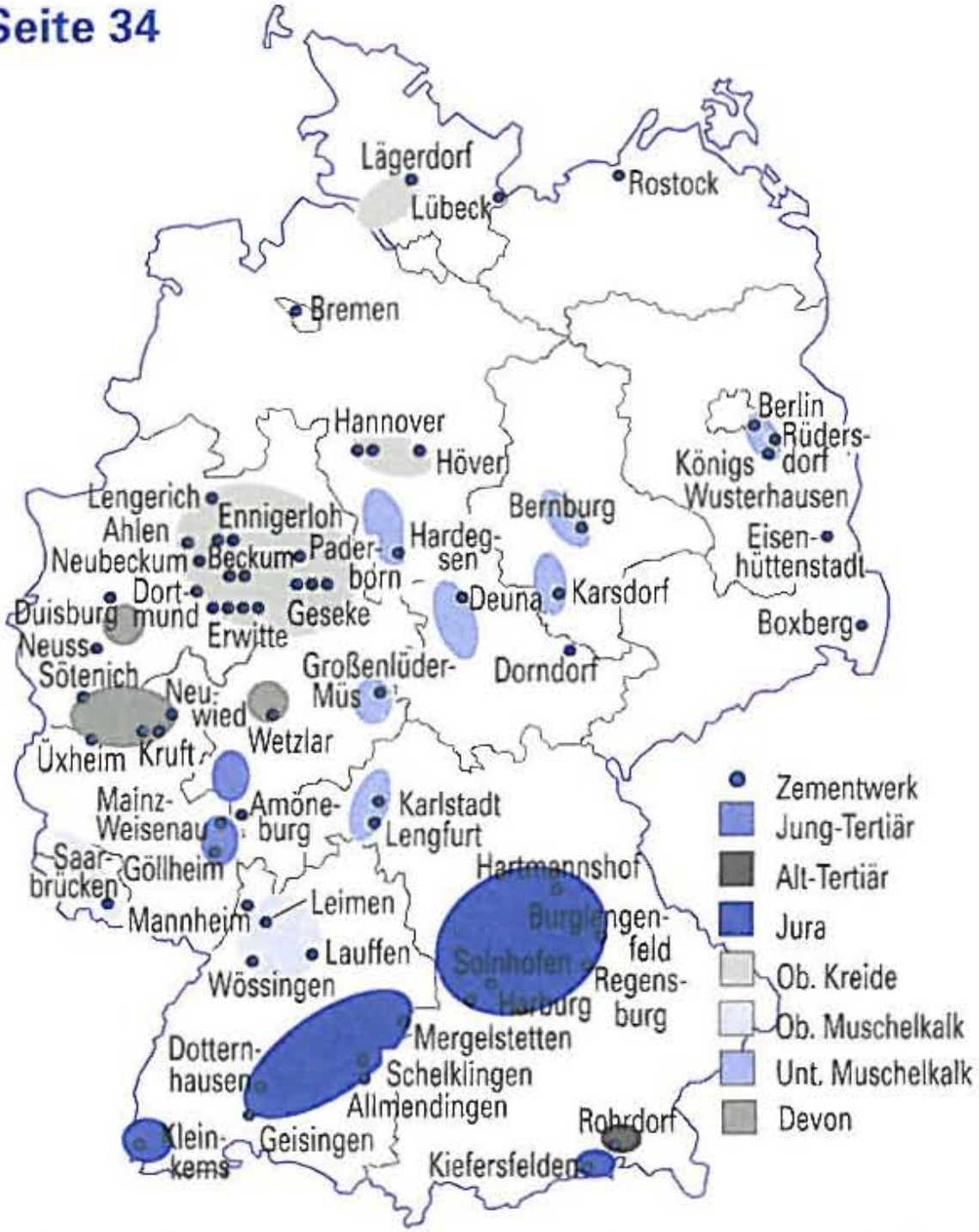


Bild I.3.1-1: Zementwerke in Deutschland – Geologische Herkunft der Rohstoffe

Seite 96

Änderung der letzten Zeile des Abschnitts 3.3.3:

von ca. 15,4 Mio. t/a.

Seiten 200/201

Tafel II.2.1-2, Änderungen in der vorletzten Reihe (S. 201) und Änderung der Fußnoten:

X[4)]	X[4)]	X[5)]	X[6)]	X[4)]	X[4)]	X[6)]	X[5)]	X[5)]

[1)] Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 R mit einem Hüttensandgehalt von ≤ 50 M.-%
[2)] Nur für Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone und für Räumerlaufbahnen
[3)] Zusätzliche Regelungen bei Sulfatangriff (s. Abschnitt II.7.3.3)
[4)] Für Vorspannung mit sofortigem Verbund, zz. nach DIN 4227 mindestens der Festigkeitsklasse 32,5 R
[5)] Für Vorspannung mit sofortigem Verbund, zz. nach DIN 4227 mindestens der Festigkeitsklasse 42,5
[6)] Für Vorspannung mit sofortigem Verbund, zz. nach DIN 4227 nicht verwendbar

Seite 202

Tafel II.2.1-3, Änderungen der Fußnoten [1)] und [2)]:

[1)] Bei XF4: Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 mit einem Hüttensandgehalt von ≤ 50 M.-%
[2)] Bei XF4: Nur für Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone und für Räumerlaufbahnen

Seite 365

Tafel II.7.1-2, Ergänzung der ersten beiden Reihen:

	Expositionsklasse			
	XF1	XF2	XF3	XF4[2)]

Seite 387

Tafel II.7.3-3, Änderungen in den beiden letzten Reihen:

Mindestzementgehalt ohne Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	280	320[3)4)]	320[3)]
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	270	270[3)4)]	270[3)]

3 Zementherstellung

3.1 Einsatzstoffe für den Klinkerbrennprozess

3.1.1 Einsatzstoffe für den Klinkerbrennprozess

Die Ausgangsstoffe zur Herstellung des *Portlandzementklinkers* müssen hauptsächlich Calciumoxid (CaO) und Siliciumdioxid (SiO_2) sowie in geringen Mengen Oxide des Aluminiums (Al_2O_3) und des Eisens (Fe_2O_3) enthalten.

Gesteine, die diese Verbindungen liefern, sind *Kalkstein* oder *Kreide* und *Ton* oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat ($CaCO_3$). Wesentliche Bestandteile in Tonvorkommen sind die sehr feinkörnigen Tonminerale sowie in geringen Mengen Quarz und Feldspäte. Die Tonminerale und der Feldspat sind Verbindungen, die sich im Wesentlichen aus Siliciumdioxid, Aluminiumoxid und den Alkalioxiden K_2O und Na_2O zusammensetzen. Der Quarz besteht ausschließlich aus Siliciumdioxid. Eisenoxid liegt im Ton als Bestandteil der Tonminerale oder als Eisenhydroxid (FeOOH) und z. T. auch als FeS_2 (Pyrit, Markasit) vor. In Abhängigkeit von der örtlichen Rohstoffsituation am Standort des Zementwerks kann es erforderlich sein, der Rohstoffmischung reinen Kalkstein, Eisenerz oder Sand als Korrekturstoffe zuzusetzen, um fehlende chemische Bestandteile auszugleichen.

Einen Überblick über die geographische und geologische Herkunft der *Rohstoffe* sowie die Lage der *Zementwerke* in Deutschland gibt **Bild I.3.1-1**.

Bild I.3.1-1: Zementwerke in Deutschland – Geologische Herkunft der Rohstoffe

Neben natürlichen Rohstoffen können auch sekundäre Rohstoffe, wie z. B. Kalkschlämme, Gießereialtsande und Flugaschen, zum Einsatz kommen [Spr2]. Sie enthalten als Hauptbestandteile

ebenfalls Siliciumdioxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid und/oder Calciumoxid und werden mit den Rohstoffen mengenmäßig so kombiniert, dass bei homogener Aufbereitung die Anforderungen an die vorgegebene Klinkerzusammensetzung erfüllt werden. Die Anforderungen, die an die stoffliche Zusammensetzung eines *Sekundärrohstoffs* gestellt werden, hängen in erster Linie von der vorgegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerks, d. h. der Zusammensetzung der vorliegenden Kalkstein- bzw. Mergelvorkommen ab.

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringem Umfang wird thermische Energie auch für die Trocknung von Rohstoffen und weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, eingesetzt. Die traditionellen *Brennstoffe* in der Zementindustrie sind seit Mitte der 70er-Jahre Steinkohle und Braunkohle, in geringem Umfang auch schweres Heizöl. Zum Anfahren des Ofens sowie für Trocknungsprozesse wird darüber hinaus leichtes Heizöl und Gas verwendet. Seit den 90er-Jahren wird ein nennenswerter Teil der Kohle durch Petrolkoks ersetzt. Petrolkoks ist eine kohleähnliche Fraktion des Mineralöls, die bei der Rohölaufbereitung anfällt.

Die Entwicklung des *Brennstoffenergieverbrauches* nach Energieträgern in der Zementindustrie ist in der **Tafel I.3.1-1** dargestellt. Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage vermehrt *Sekundärbrennstoffe* beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieverbrauch der deutschen Zementindustrie betrug 1998 etwa 19%. Zum Einsatz kommen vor allem Altreifen und Altöl sowie in geringerem Maße Bleicherden, Altholz, Kunststoffabfälle und aufbereitete Fraktionen von Produktions- und Gewerbeabfällen sowie von Hausmüll [VDZ2].

Tafel I.3.1-1: Brennstoffenergieverbrauch nach Energieträgern [VDZ1]

Brennstoff	1987 [10^6 GJ/a]	1990 [10^6 GJ/a]	1994 [10^6 GJ/a]	1998 [10^6 GJ/a]
Steinkohle	48,2	47,5	49,9	32,0
Braunkohle	56,0	45,8	32,5	33,2
Petrolkoks	0,8	0,8	1,9	10,2
Heizöl S	4,5	4,2	5,8	4,5
Heizöl EL	0,2	0,2	0,2	0,3
Erdgas und andere Gase	2,4	0,8	0,3	0,6
sonstige fossile Brennstoffe	2,9	2,1	1,9	1,1
fossile Brennstoffe insgesamt	115,0	101,4	92,5	81,9
Sekundärbrennstoffe insgesamt	4,9	8,1	10,4	18,8

Um eine gleichmäßig hohe Produktqualität zu erreichen und gleichzeitig den Eintrag umweltrelevanter Spurenelemente in den Klinkerbrennprozess zu begrenzen, werden nur Sekundärbrennstoffe und Sekundärrohstoffe definierter Zusammensetzung und Herkunft eingesetzt. Dabei werden nur solche Stoffe verwendet, die sich nicht negativ auf die Emissionen des Herstellungsprozesses oder die Qualität des Zements auswirken. Daher unterliegen sie einer strengen Qualitätsüberwachung und Eingangskontrollen im Zementwerk. Durch den Einsatz der Sekundärstoffe werden fossile Brennstoffe und Rohstoffe substituiert. Dadurch werden natürliche Ressourcen geschont und gleichzeitig Rückstände aus anderen Prozessen im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes verwertet.

Die Verwertung der Abfallstoffe erfolgt dabei vollständig, da auch bei diesen Stoffen der nicht brennbare Anteil für die Klin-

Die Tagesproduktion von Schachtöfen liegt unter 300 t Klinker, der Wärmebedarf liegt zwischen 3100 bis 4200 kJ/kg Kl. Sie sind nur für sehr kleine Werke wirtschaftlich. Der Anteil der Schachtöfen an der genehmigten Ofenkapazität beträgt in Deutschland heute nur noch 0,9%.

Kühler

An den Ofenauslauf schließt sich ein *Klinkerkühler* an. Zur Klinkerkühlung werden *Rostkühler*, *Satelliten-* oder *Planetenkühler* und *Rohrkühler* eingesetzt.

Im Rostkühler wird das auf einem Transportrost bewegte Klinkerbett mit Luft im Querstrom gekühlt. Durch die Verwendung von mehreren Gebläsen unterhalb des Rostes lassen sich in verschiedenen Temperaturzonen des Kühlers unterschiedliche Luftdurchsätze einstellen, wodurch die Kühlung des Klinkers optimiert werden kann. Der größte Teil der aufgeheizten Kühlluft wird als Verbrennungsluft im Ofen *(Sekundärluft)* und ggf. im Calcinator *(Tertiärluft)* genutzt. Die überschüssige Luftmenge wird als Kühlerabluft oder als Mittenabluft abgeleitet. Sie kann zusätzlich zur Trocknung genutzt werden.

Aufgrund der gestiegenen Ofenleistungen und der Verbreitung der Vorcalciniertechnik, die die Entnahme von Tertiärluft am Ofenkopf oder aus dem Kühler erfordert, werden moderne Anlagen heute fast ausschließlich mit Rostkühlern ausgestattet.

Die Fortschritte in der Rostkühlertechnik haben in den vergangenen zehn bis fünfzehn Jahren zu einer deutlichen Verbesserung der thermischen Effizienz und der Verfügbarkeit der Ofenanlagen geführt. In dieser Zeit wurden viele Klinkerkühler in Deutschland mit dem Ziel modernisiert, höhere Verbrennungslufttemperaturen und gleichzeitig kältere Klinkertemperaturen

mit niedrigeren Kühlluftvolumenströmen zu erreichen, ohne dass die Verfügbarkeit der Ofenanlage beeinträchtigt wird.

Mit Rostkühlern lassen sich heute Kühlerwirkungsgrade von bis zu 75% erreichen. Eine weitere Verbesserung könnte erreicht werden, wenn sich prozess- und werkstofftechnische Probleme lösen lassen, die bei Sekundärlufttemperaturen von über 1000 bis 1100 °C auftreten können. Nach der Kühlung hat der Klinker eine Temperatur von 80 bis 200 °C.

Satellitenkühler spielen nur bei Ofendurchsätzen bis 3000 t/d eine Rolle; Rohrkühler wurden in den letzten Jahren kaum noch gebaut. Im Rohrkühler sowie im Satellitenkühler, der aus zehn oder elf am Umfang des Drehrohrs befestigten Kühlrohren besteht, gibt der Klinker seine Wärme im Gegenstrom an die Kühlluft ab. Da nur so viel Luft zur Kühlung des Klinkers verwendet werden kann wie als Verbrennungsluft benötigt wird, liegen die Klinkerendtemperaturen bei Satelliten- und Rohrkühlern höher als bei Rostkühlern. Andererseits entsteht keine Kühlerabluft, entsprechende Entstaubungsanlagen sind daher nicht erforderlich. Die Abstrahlverluste von Satelliten- und Rohrkühler sind höher als von Rostkühlern.

Abwärmenutzung

Moderne Drehofenanlagen zeichnen sich durch eine effiziente Nutzung der eingesetzten Energie aus. Verbleibende Energieverluste sind z. B. durch Nutzung von Kühlerabluft und ggf. Bypassgas weitgehend minimiert. Damit erreichen Ofenanlagen der Zementindustrie Anlagenwirkungsgrade von über 70%. Der größte Teil der in den Abgasen enthaltenen Energie wird zur Trocknung der Rohstoffe und der Kohle sowie gegebenenfalls von anderen Stoffen wie z. B. Hüttensand verwertet. Auf diese Art wird die Abwärme am wirtschaftlichsten und effizientesten genutzt.

Falls darüber hinausgehende Abwärme zur Verfügung steht, kann es im Einzelfall wirtschaftlich sinnvoll sein, diese zur Erzeugung von Heißwasser oder Prozessdampf zu nutzen. Da in einem Zementwerk kein Dampf oder nur in geringem Umfang Heizleistung benötigt wird, lohnt sich deren Erzeugung nur, wenn eine gesicherte Abgabe, beispielsweise in Form von Fernwärme oder Prozessdampf an einen benachbarten Ort oder Betrieb, möglich ist. Problematisch ist in diesem Fall die Kopplung verschiedener Prozesse, die eine Redundanz der Energieerzeugungsanlagen erfordert. Gerade im Winter, wenn Fernwärme in besonderem Maße benötigt wird, ist die Klinkerproduktion und damit der Zementabsatz jedoch gering. Dementsprechend werden Drehofenanlagen in der Regel über mehrere Wochen oder Monate zur Wartung stillgesetzt. Abgaswärme kann im Einzelfall in elektrische Energie umgewandelt werden, allerdings werden hierdurch im Vergleich zur direkten thermischen Nutzung geringere Wirkungsgrade erzielt.

3.2.2 Reaktionen beim Brennen und Kühlen des Klinkers

Während des Brennvorgangs laufen im Brenngut verschiedene chemische Reaktionen – teils nacheinander, teils parallel zueinander – ab. Der zum Brennen des Zementklinkers benötigte „theoretische Energiebedarf" wird dabei durch die Reaktionsenthalpien der einzelnen Teilreaktionen bestimmt. Dabei überlagern sich wämeverbrauchende (endotherme) und -freisetzende (exotherme) Teilreaktionen.

Beim Erhitzen des Brennguts entweicht zunächst bei Temperaturen bis 200 °C das flüssige Wasser. Zwischen 100 und 400 °C geben die Tonminerale ihr adsorptiv gebundenes Wasser ab. Bei höheren Temperaturen zwischen etwa 400 bis 750 °C werden die

Tonminerale zersetzt und auch das chemisch gebundene Wasser ausgetrieben (Dehydratation).

Die Zersetzung des im Rohmehl enthaltenen Calciumcarbonats in CaO und CO_2, die "Entsäuerung" des Kalksteins, beginnt in Gegenwart von SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3 schon bei 550 bis 600 °C und verläuft oberhalb von 900 °C sehr schnell. Dieser endothermen Reaktion stehen Neubildungsreaktionen gegenüber, die zum Teil exotherm und parallel zu den Dissoziationsvorgängen verlaufen. Dabei entstehen *Dicalciumsilicat* (C_2S) aus Calciumoxid und Siliciumdioxid sowie verschiedene Al_2O_3- und Fe_2O_3-haltige Zwischenverbindungen, die jedoch mit Beginn der Schmelzbildung bei ca. 1280 °C wieder zerfallen. In Gegenwart der Schmelze, deren Anteil im Brenngut bei der Sintertemperatur von 1450 °C etwa 20 bis 30 M.-% beträgt und in der der überwiegende Anteil des ursprünglich in den Rohstoffen enthaltenen Aluminium- und Eisenoxids vorliegt, reagiert das vorhandene Calciumoxid mit dem Dicalciumsilicat unter Bildung von *Tricalciumsilicat* (C_3S).

Die für den Klinkerbrennprozess benötigte Energie wird zu mehr als 50% für die Dissoziation des Calciumcarbonats, für die Trocknung und Aufheizung des Rohmaterials und zur Deckung der Wärmeverluste benötigt.

Bild I.3.2-4 zeigt schematisch, nach welcher *Verweilzeit* und in welchem Bereich des Klinkerbrennprozesses die *Brenngutreaktionen* und Mineralneubildungen stattfinden [Wol1].

Beim anschließenden *Kühlen des Klinkers* entstehen durch Kristallisation der Schmelze das Tricalciumaluminat (C_3A) und das Calciumaluminatferrit $C_2(A,F)$. Die Kühlgeschwindigkeit beeinflusst dabei maßgeblich die Eigenschaften des Klinkers. Feinkörniges und mit $C_2(A,F)$ verwachsendes C_3A reagiert langsamer mit Wasser als grob kristallines C_3A, welches bei geringer

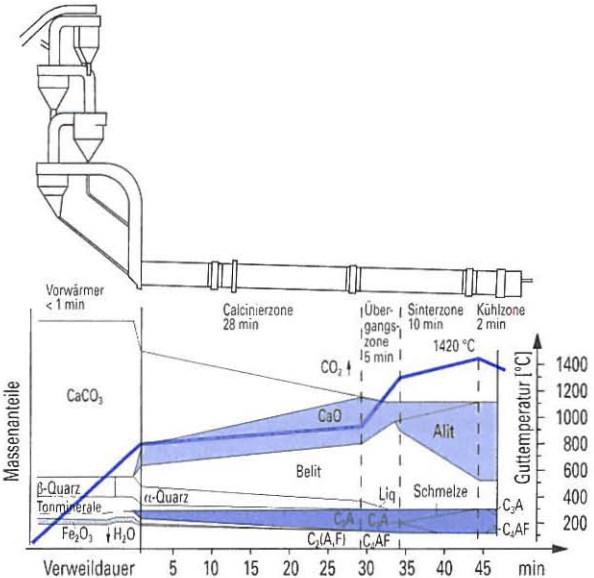


Bild I.3.2-4: Brenngutreaktionen und Mineralneubildungen in einer Drehofenanlage mit Zyklonvorwärmer

Kühlgeschwindigkeit entsteht. Damit das Tricalciumaluminat und das Calciumaluminatferrit möglichst feinkörnig kristallisieren, ist es erforderlich, den Klinker von Sintertemperatur auf 1200 °C ausreichend schnell zu kühlen. Neben den Abkühlgeschwindigkeiten bestimmt in erster Linie die Klinkerzusammensetzung die C_3S-Stabilität [Hoe1]. Eine schnelle Kühlung des Klinkers führt auch zu einer fein kristallinen Struktur des C_3S und kann dadurch die erforderliche Mahlenergie vermindern.

Generell vermindert eine schnelle Kühlung des Klinkers im Hochtemperaturbereich den Wasseranspruch des Zements. Bei sulfatoptimiertem Zement ist die schnelle Kühlung umso vorteilhafter für das Erstarrungsverhalten und die Festigkeitsentwicklung des Zements, je höher der C_3S- und C_3A-Gehalt des Klinkers ist.

Beurteilung des Zementklinkers

Aufschluss über Art, Ausbildung und Verteilung der Phasen im *Zementklinker* gibt die mikroskopische Untersuchung, die meistens an polierten und mit Wasser oder anderen Flüssigkeiten geätzten Anschliffen im senkrecht auffallenden Licht (Auflicht) ausgeführt wird. Die *Phasenzusammensetzung* des Klinkers lässt sich aus den Werten der chemischen Analyse unter der Annahme errechnen, dass die Klinkerphasen die durch ihre Formeln angegebene Zusammensetzung haben und dass die Klinkerschmelze beim Kühlen des Klinkers im Gleichgewicht mit den festen Phasen kristallisiert. Das ist jedoch beim technischen Brennprozess nicht der Fall. Die Berechnung der potentiellen Klinkerzusammensetzung liefert daher für den Tricalciumsilicatgehalt etwas zu niedrige und für den Dicalciumsilicatgehalt etwas zu hohe Werte.

Die Rohstoff- und Klinkerzusammensetzung wird in der Praxis im Allgemeinen durch den *Kalkstandard* (KSt), den *Silicatmodul* (SM) und den *Tonerdemodul* (TM) gekennzeichnet:

$$KSt = \frac{100 \cdot CaO}{2{,}80\ SiO_2 + 1{,}18\ Al_2O_3 + 0{,}65\ Fe_2O_3} \qquad \text{[Gl 3.2-1]}$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \qquad \text{[Gl 3.2-2]}$$

$$TM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \qquad \text{[Gl 3.2-3]}$$

Der Kalkstandard gibt den im Rohstoff oder Klinker tatsächlich vorhandenen CaO-Gehalt in Prozentanteilen desjenigen CaO-Gehalts an, der unter technischen Brenn- und Kühlbedingungen im Höchstfall an SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3 gebunden werden kann. Der Silicatmodul ist ein Anhaltswert für das Mengenverhältnis der bei Sintertemperatur überwiegend in den festen Silicaten gebundenen Kieselsäure und dem in der Schmelze vorliegenden Al_2O_3- und Fe_2O_3-Anteil. Er kennzeichnet demnach das Verhältnis fest/flüssig in der Sinterzone des Drehofens und ist ein Maß für die „Brennbarkeit" des Rohstoffgemisches. Der Tonerdemodul gibt Aufschluss über das Mengenverhältnis Aluminat/Aluminatferrit und demnach über die Zusammensetzung der Klinkerschmelze. Bei einem Tonerdemodul von 0,638 wird rechnerisch das gesamte im Klinker enthaltene Aluminumoxid in Form von Aluminatferrit mit der Zusammensetzung $4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ gebunden.

3.2.3 Zementherstellung durch Mahlen und Mischen

Nach dem Brennen und Kühlen wird der Klinker in Silos oder geschlossenen Hallen gelagert, um Emissionen von Klinkerstaub möglichst zu vermeiden. Die Klinkerkörner haben eine fein- bis grobstückige Form, im Korngrößenbereich unter etwa 50 mm. Zur Herstellung von Zement kann der Klinker allein oder mit weiteren Hauptbestandteilen gemeinsam feingemahlen werden. Zur Regelung des Erstarrens wird dem Mahlgut Gipsstein oder ein Gips-Anhydrit-Gemisch zugesetzt. Bei der gemeinsamen Feinmahlung lassen sich die Korngrößenverteilungen der einzelnen Komponenten nicht getrennt beeinflussen.

Da die verschiedenen Einsatzstoffe unterschiedliche Feuchten und *Mahlbarkeiten* aufweisen können, kann für eine optimale Zementherstellung auch eine getrennte Stoffstromverarbeitung

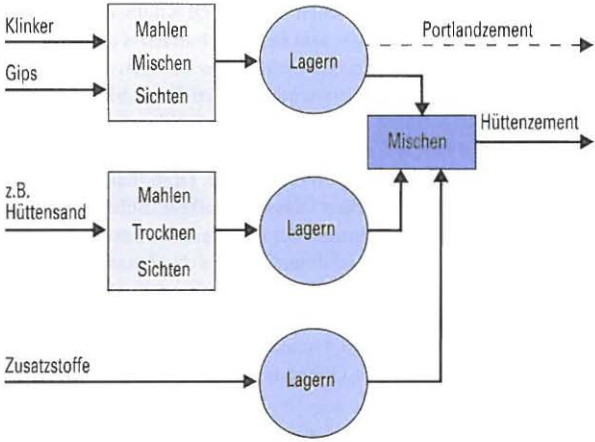


Bild I.3.2-5: Anlagensystem für die getrennte Mahlung und Mischung der Komponenten am Beispiel der Hüttenzementerzeugung

in Betracht kommen. In diesem Fall werden die Zementkomponenten getrennt feingemahlen und die mehlfeinen Zwischenprodukte zu Zement gemischt. Zur Zementherstellung [Ros1] werden *Verbundmahlanlagen*, *zweistufige Mahlsysteme* und *getrennte Mahlsysteme* mit anschließender *Mischung* der mehlfeinen Vorprodukte (s. **Bild I.3.2-5**) verwendet. Bei der Kombination unterschiedlicher *Mahlverfahren* können die *Zementkomponenten* getrennt getrocknet und auf eine separat zu optimierende Mahlfeinheit vorgemahlen werden.

Gemeinsame Vermahlung

Seit mehr als 100 Jahren werden zur Mahlung von Zementrohstoffen und Zement *Kugelmühlen* (s. **Bild I.3.2-6**) eingesetzt [Sch1]. Sie zeichnen sich durch hohe Verfügbarkeit und Robustheit aus. Die Mühlen werden mit einem Rohrdurchmesser von bis zu 6 m und einer Rohrlänge von bis zu 20 m gebaut. Sie sind bis zu einem Füllungsgrad von knapp 30% mit Mahlkugeln gefüllt, verfügen über Antriebsleistungen von bis zu 10 MW und erreichen Durchsatzleistungen von bis zu 200 t/h. Das Mahlgut

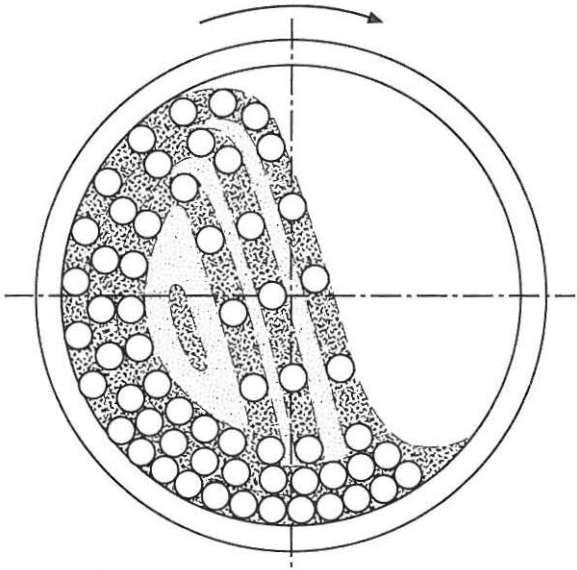


Bild I.3.2-6: Schematische Darstellung der Bewegung des Mahlkörper-Mahlgut-Gemisches in Kugelmühlen

wird durch die Drehbewegung des Rohrs und die dadurch hervorgerufene Roll- und Fallbewegung der Mahlkugeln zerkleinert. Die meisten Kugelmühlen arbeiten im Kreislauf mit einstellbaren Windsichtern, in denen das Mahlgut mit der geforderten Feinheit abgeschieden wird. Das Sichtergrobgut gelangt wieder in die Mühle zurück. Der Zement wird laufend auf Mahlfeinheit und Zusammensetzung kontrolliert. Anhand der Ergebnisse werden die Massenströme der in die Mühle einlaufenden Zementbestandteile geregelt.

Im Vergleich mit anderen Mühlentypen haben Kugelmühlen den geringsten mahltechnischen Wirkungsgrad bzw. die niedrigste *Energieausnutzung* und deshalb den größten spezifischen Energieverbrauch [Ell1]. Aus diesem Grund werden heute zur Zementmahlung auch Gutbett-Walzenmühlen und Vertikal-Wälzmühlen eingesetzt. Diese Mühlen ermöglichen eine deutlich bessere Energieausnutzung, sodass der Energieaufwand zur Zerkleinerung im Vergleich mit Kugelmühlen wesentlich verringert werden kann.

In *Gutbett-Walzenmühlen* (**Bild I.3.2-7**) wird das Mahlgut durch hohe Druckbeanspruchung in einem Spalt zwischen zwei sich gegensinnig drehenden Mahlwalzen zerkleinert und zu so genannten Schülpen gepreßt [Ell2, Sch2]. Die Walzen werden mit bis zu 2 m Durchmesser und bis zu 1,4 m Länge gebaut. Der in den Schülpen enthaltene Feingutanteil < 90 µm von bis zu 40% muß durch Deglomeration der Schülpen gewonnen werden. In Gutbett-Walzenmühlen wird heute die von den derzeit eingesetzten Mahlanlagen höchst mögliche Energieausnutzung erreicht. Sie lassen sich in unterschiedlicher Anordnung in bestehende und neue Mahlanlagen mit Kugelmühlen integrieren. Neue Mahlanlagen werden meist nach dem Konzept der Teilfertigmahlung (**Bild I.3.2-8**) gebaut. Dabei wird das Frischgut der Gutbett-Walzenmühle aufgegeben, die im Kreislauf mit einem Deglomerator

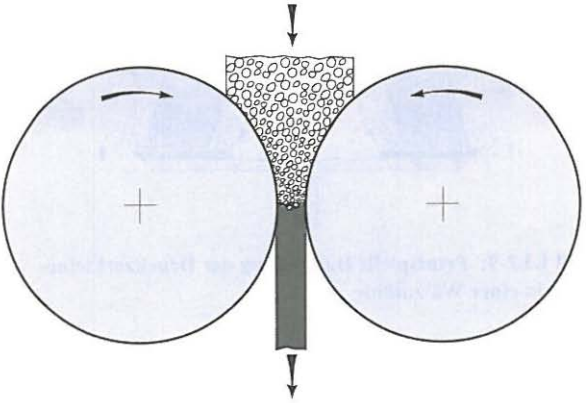


Bild I.3.2-7: Prinzipielle Darstellung der Druckzerkleinerung

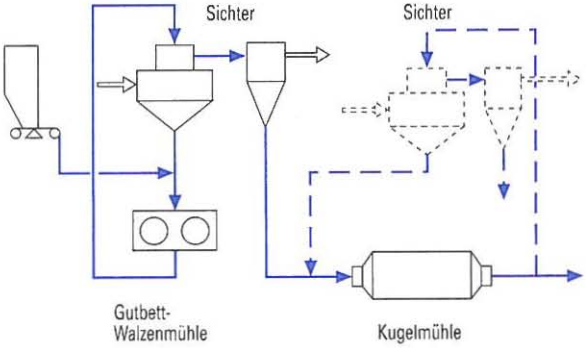


Bild I.3.2-8: Fließbild einer Mahlanlage mit Kugelmühle und Gutbett-Walzenmühle nach dem Konzept der Teilfertigmahlung

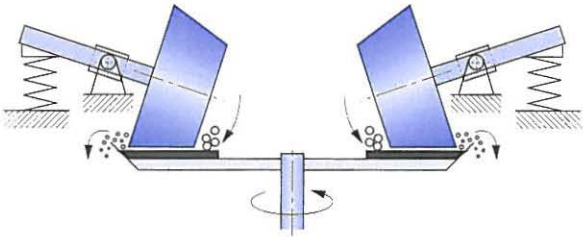


Bild I.3.2-9: Prinzipielle Darstellung der Druckzerkleinerung in einer Wälzmühle

und Sichter arbeitet. Das Sichterfeingut mit etwa 50 bis 80% Fertiggut wird dem zweiten Mahlvorgang mit einer Kugelmühle zugeführt, die mit oder ohne Sichter ausgerüstet sein kann.

Vertikal-Wälzmühlen [Fei1] arbeiten mit einem im gleichen Gehäuse integrierten Sichter. Das Mahlgut wird zwischen einem sich drehenden Mahlteller und zwei bis vier darauf hydraulisch angepressten Mahlwalzen durch Druck und Reibung zerkleinert (s. **Bild I.3.2-9**). Die Mahlteller besitzen Durchmesser von bis zu 5,5 m, die Mahlwalzen von bis zu 2,5 m. Das Mahlgut wird durch pneumatischen und mechanischen Transport dem direkt über dem Mahlraum angeordneten Sichter zugeführt und in Sichtergrobgut und Sichterfeingut getrennt. Zum Mahlguttransport werden große Gasvolumenströme benötigt. Daher kann in Wälzmühlen auch feuchtes Mahlgut während der Mahlung vorteilhaft gleichzeitig getrocknet werden. Dies ist u. a. für die Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen von Bedeutung. Die Durchsatzleistungen von Wälzmühlen können mehrere 100 t/h erreichen.

In Vertikal-Wälzmühlen und Gutbett-Walzenmühlen werden engere *Korngrößenverteilungen* des Fertigguts als in Kugel-

mühlen erzeugt. Außerdem muss für die zielsichere Einstellung der Zementeigenschaften berücksichtigt werden, dass in Wälzmühlen und Gutbett-Walzenmühlen niedrigere Mahlguttemperaturen als in Kugelmühlen vorliegen.

Der fertige Zement wird meist in Silos gelagert, aus denen der Zement als Sack- oder als Siloware zum Versand kommt.

Getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen

Die gestiegene Marktbedeutung von *Portlandkompositzementen* hat in der Zementindustrie zu einer Zunahme der Zementherstellung durch *Mischen* getrennt feingemahlener Zementbestandteile geführt. Für den verfahrenstechnischen Ablauf gibt es zwei Möglichkeiten:

- *Getrenntes Vormahlen* von Vorprodukten auf eine bestimmte Feinheit und anschließendes *gemeinsames Feinmahlen* der Vorprodukte auf Fertiggutfeinheit,
- *Getrenntes Feinmahlen* der Komponenten auf Fertiggutfeinheit und anschließendes Mischen der mehlfeinen Stoffe.

Auch hierbei müssen, wie beim gemeinsamen Feinmahlen der Zementbestandteile, folgende Vorgänge ablaufen:

- Zerkleinerung der grobkörnigen Ausgangsstoffe,
- Einstellung der gewünschten Feinheit,
- Einstellung der Korngrößenverteilung,
- Homogenisierung der Mahlgutkomponenten,
- Vergleichmäßigung des Mahlgutstroms.

Schon aus wirtschaftlichen Gründen kann es bei größeren Mahlbarkeitsunterschieden der Zementbestandteile und angestrebter hoher Mahlfeinheit des Zements vorteilhaft sein, die Komponenten oder geeignet zusammengesetzten Vorgemische getrennt auf eine bestimmte *Mahlfeinheit* oder *Korngrößen-*

verteilung vorzumahlen und den Zement im letzten Schritt durch gemeinsames, werkmäßiges Feinmahlen herzustellen. Dabei tritt gleichzeitig die erforderliche *Homogenisierung* und *Vergleichmäßigung* der Komponenten ein. Außerdem besteht durch eine nachgeschaltete Feinmahlung die Möglichkeit, ungünstige Kornverteilungen der Vorprodukte, die die Gebrauchseigenschaften des Zements beeinträchtigen würden, durch die *Nachmahlung* zu verbreitern. Dadurch kann der Wasseranspruch gesenkt und gleichzeitig auch eine für den Erstarrungsablauf erforderliche homogene Verteilung des Sulfatträgers erzielt werden. Bei diesem Verfahren kann die Arbeitsweise der Vor-Mühlen und der Fein-Mühlen besser als beim gemeinsamen Mahlen auf das jeweilige Mahlgut eingestellt und damit meist eine höhere Energieausnutzung erzielt werden als beim gemeinsamen Vermahlen. Die erreichte Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung des Produkts hängen von der Mahlbarkeit der Komponenten und dem eingesetzten Mühlentyp ab. Die Korngrößenverteilungen der Zementkomponenten können demgegenüber bei der gemeinsamen Feinmahlung nicht getrennt beeinflusst werden.

Eine Verfahrensvariante besteht darin, eine bereits getrennt feingemahlene Komponente dem *Mahlkreislauf* einer Umlaufmahlanlage zuzuführen und gemeinsam mit dem Mühlenaustragsgut zunächst einem Sichter aufzugeben. Dabei tritt die gewünschte Homogenisierung und Vergleichmäßigung ein.

Bei getrennter Vermahlung der Zementbestandteile oder Vorgemische ist es möglich, diese sowohl auf unterschiedliche Mahlfeinheiten als auch auf verschiedene, bestimmte Korngrößenverteilungen einzustellen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die massebezogenen Oberflächen und – in bestimmten Grenzen – auch die Korngrößenverteilungen der Komponenten aufeinander abzustimmen, um damit die *Leistungsfähigkeit* der Ausgangs-

kerphasenbildung verwendet wird. So stellen z. B. die Stahlkarkassen der Altreifen einen wichtigen Eisenoxid-Anteil des Brennguts dar. Somit werden Sekundärstoffe beim Klinkerbrennprozess sowohl energetisch als auch stofflich verwertet.

Bild I.3.1-2 zeigt das *Dreistoffdiagramm* CaO, SiO_2, Al_2O_3 + Fe_2O_3. Darin ist die Zusammensetzung des Zementklinkers, einiger ausgewählter Sekundärrohstoffe sowie der Aschen einiger Sekundärbrennstoffe dargestellt.

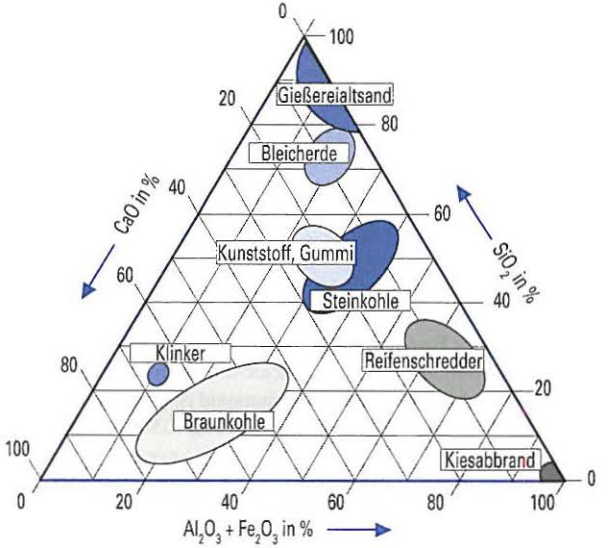


Bild I.3.1-2: Dreistoffdiagramm CaO, SiO_2, Al_2O_3 + Fe_2O_3 mit Zementklinker und Aschebestandteilen unterschiedlicher Roh- und Brennstoffe

3.1.2 Hauptbestandteile des Zements

Portlandzementklinker

Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das in einer Ofenanlage bei einer Temperatur von über 1400 °C bis zum Sintern erhitzt wird. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei Verbindungen, die so genannten *Klinkerphasen*. Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumaluminate, die dem Zement seine charakteristischen Eigenschaften bei der hydraulischen Erhärtung geben. Die Bezeichnungen für die Klinkerphasen *Alit* und *Belit* stammen von A. E. Törnebohm (1897), der die mikroskopisch zu erkennenden Hauptphasen nach den ersten Buchstaben des Alphabets benannt hat, da er ihre Zusammensetzung noch nicht kannte. Die Bezeichnungen werden auch heute noch verwendet, um die Silicate des Klinkers, die immer geringe Mengen Aluminium-, Eisen- und Magnesiumoxid enthalten, von den reinen Silicaten zu unterscheiden. Eine Übersicht über die *Phasenzusammensetzung* des *Zementklinkers* gibt **Tafel I.3.1-2**.

Das *Tricalciumsilicat* ist die Verbindung, dem der Zement seine wesentlichen Eigenschaften verdankt. Fein gemahlen und mit Wasser zu einer Paste angemacht, erhärtet es schnell und erreicht sehr hohe Festigkeiten. Tricalciumsilicat bildet sich durch chemische Reaktion von Calciumoxid (CaO) und Siliciumdioxid (SiO_2) bei Temperaturen oberhalb von 1250 °C. Geringere Anteile von Fe, Al und Mg sind in das C_3S-Gitter eingebaut. Allerdings läuft dieser Prozess erst in Gegenwart einer Schmelze, die vorwiegend aus Calciumoxid, Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) besteht, ausreichend schnell ab. Daher verwendet man zur Herstellung des Portlandzementklinkers Rohstoffgemische, die hauptsächlich CaO und SiO_2 und in geringeren Mengen Al_2O_3 und Fe_2O_3 enthalten. Bei einem aus-

Tafel I.3.1-2: Phasenzusammensetzung des Zementklinkers

Klinkerphasen	chemische Formeln	Kurzbezeichnung	Gehalt in M.-%	
Tricalciumsilicat (Alit)	3 CaO SiO_2	C_3S	H M N	80 63 45
Dicalciumsilicat (Belit)	2 CaO · SiO_2	C_2S	H M N	32 16 0
Calciumaluminatferrit	2 CaO · (Al_2O_3, Fe_2O_3)	$C_2(A,F)$	H M N	14 8 4
Tricalciumaluminat	3 CaO · Al_2O_3	C_3A	H M N	15 11 7
freies CaO	CaO		H M N	3 1 0,1
freies MgO (Periklas)	MgO		H M N	4,5 1,5 0,5

H: Hohe Gehalte, M: Mittlere Gehalte, N: Niedrige Gehalte

reichenden Kalkgehalt in der Rohstoffmischung wird die gesamte Kieselsäure in Tricalciumsilicat übergeführt. In der Praxis sollte diese Kalkgrenze nicht überschritten werden, sodass der Klinker neben Tricalciumsilicat in den allermeisten Fällen auch mehr oder weniger hohe Gehalte an *Dicalciumsilicat* aufweist.

Das kalkärmere Dicalciumsilicat erhärtet ebenso wie das Tricalciumsilicat hydraulisch, jedoch wesentlich langsamer, erreicht

aber nach längerer Zeit die gleichen oder sogar noch höhere Festigkeiten.

Im *Calciumaluminatferrit* ist der größte Teil des im Klinker enthaltenen Eisenoxids und ein Teil des Aluminiumoxids gebunden. Es ist eine Mischkristallverbindung, in der sich Al_2O_3 und Fe_2O_3 gegenseitig vertreten können. Im Zementklinker entspricht seine Zusammensetzung etwa der Formel $4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. Das Calciumaluminatferrit kann bis zu etwa 2 M.-% MgO in sein Kristallgitter aufnehmen. Damit ist ein Farbwechsel von braun nach grau verbunden, dem der Portlandzement seine Farbe verdankt. Zur hydraulischen Erhärtung trägt das Calciumaluminatferrit wenig bei.

Der im Calciumaluminatferrit nicht gebundene Teil des Aluminiumoxids bildet das *Tricalciumaluminat*. Es reagiert mit Wasser zwar sehr schnell und wirkt sich daher vor allem auf das Erstarren aus, seine hydraulischen Eigenschaften sind aber nicht besonders ausgeprägt. In Verbindung mit den Silicaten erhöht es jedoch die Anfangsfestigkeit des Zements.

Nebenbestandteile des Portlandzementklinkers sind das *freie CaO* (ungebundenes CaO, *freier Kalk*, *Freikalk*) und das *freie MgO (Periklas)*. Bei der Reaktion mit Wasser bilden sich daraus die Hydroxide $Ca(OH)_2$ und $Mg(OH)_2$, die mehr Raum einnehmen als ursprünglich die Oxide. Freies CaO und freies MgO können daher *Kalk-* und *Magnesiatreiben* hervorrufen. Wenn sie in grob kristalliner Ausbildung in größeren Mengen vorliegen, läuft die Reaktion mit Wasser sehr langsam ab und ist dann noch nicht abgeschlossen, wenn die Erhärtung des Zements schon begonnen hat. Normgerechte Zemente weisen kein Kalk- oder Magnesiatreiben auf. Das Magnesiatreiben wird in der Zementnorm DIN 1164 durch Begrenzung des *MgO-Gehalts* im Klinker auf höchstens 5 M.-% verhindert.

Zu den Nebenbestandteilen des Klinkers gehört auch das *Alkalisulfat*. Art und Menge des Alkalisulfates hängen vom Alkali- und Sulfatgehalt des Klinkers ab. Der *Sulfatisierungsgrad* (SG) gibt den prozentualen Anteil der Alkalien an, der als Alkalisulfat vorliegt. Er wird mit folgender Formel errechnet:

$$SG = \frac{72{,}93 \cdot M.\text{-}\%\ SO_3}{94{,}20 \cdot M.\text{-}\%\ Na_2O + 61{,}98 \cdot M.\text{-}\%\ K_2O} \cdot 100 \quad [\text{Gl I.3.1-1}]$$

Durchschnittliche Sulfatisierungsgrade betragen 60 bis 80%. Bei Sulfatisierungsgraden größer als 100% kann nicht mehr der gesamte ins System eingetragene Schwefel an Alkalien gebunden werden. In diesem Fall reagiert der überschüssige Schwefel mit Ca-Verbindungen zu Calciumsulfat.

Hüttensand

Bei der Produktion von Roheisen entsteht aus Gangart, Koksasche und Zuschlägen als Nebenprodukt *Hochofenschlacke*. Durch Granulation, d. h. durch schnelle Kühlung der bis zu etwa 1500 °C heißen, flüssigen, basischen Schlacke mit Wasser auf Temperaturen unter 100 °C entsteht *Hüttensand* in einer Körnung von bis zu einigen mm. Dadurch wird erreicht, dass die Schlackenschmelze überwiegend glasig erstarrt. Moderne Granulationsanlagen bestehen aus einem Spritzkopf, in dem die flüssige Schlacke mit etwa der 10-fachen Wassermenge abgeschreckt und in ein feinkörniges Granulat zerteilt wird. Das Granulat wird einem Entwässerungssystem zugeführt, in dem eine Restfeuchte von etwa 10 bis 15% erreicht wird. Das erhitzte und ggf. verdampfte Wasser wird einem Kühlsystem und anschließend über einen geschlossenen Kreislauf wieder dem Granulierwasser zugeführt.

Hüttensand ist ein latent-hydraulischer Stoff, der mit einem Anreger (z. B. $Ca(OH)_2$, $CaSO_4$) in technisch nutzbarer Zeit hydrau-

lisch erhärtet. Die hydraulischen Eigenschaften des Hüttensands hängen im Wesentlichen von seinem Glasgehalt sowie von seiner chemischen Zusammensetzung ab. Die Zementnorm DIN 1164 fordert, dass der Glasanteil des Hüttensands mindestens zwei Drittel betragen muss. Darüber hinaus muss der Hüttensand zumindest zu zwei Dritteln aus CaO, MgO und SiO_2 bei einem Massenverhältnis $(CaO + MgO)/(SiO_2)$ größer als 1,0 bestehen.

Portlandhüttenzemente (CEM II-S) mit Hüttensandgehalten bis 35 M.-% bzw. *Hochofenzemente* (CEM III) mit Gehalten von 36 bis 80 M.-% Hüttensand werden durch gemeinsames Mahlen von Hüttensand, Portlandzementklinker und Sulfatträger hergestellt. Die beiden Hauptbestandteile können auch getrennt gemahlen und anschließend homogenisiert werden. Von insgesamt 7,0 Mio. t Hochofenschlacke wurden in Deutschland im Jahr 1999 4,9 Mio. t zu Hüttensand granuliert und nahezu vollständig der Zementherstellung zugeführt [VDE]. Rund 25% aller in Deutschland hergestellten Zemente sind entweder Portlandhütten- oder Hochofenzemente. Damit ist Hüttensand neben Portlandzementklinker einer der technisch wichtigsten *Hauptbestandteile* in deutschen Zementen.

Die latent-hydraulische Reaktion des Hüttensands führt dazu, dass die Anfangserhärtung des Zements mit zunehmendem Hüttensandgehalt langsamer abläuft. Da der Hüttensand jedoch in höherem Hydratationsalter immer noch einen deutlichen Reaktionsfortschritt zeigt, weisen die hüttensandreichen Zemente bei entsprechend sorgfältiger Nachbehandlung eine höhere Nacherhärtung nach 28 Tagen auf als z. B. Portlandzemente.

Nach DIN 1164-1 können hüttensandhaltige Zemente als *NA-Zemente* eingesetzt werden, sofern ihr Hüttensandanteil und das Na_2O-Äquivalent den in **Tafel I.3.1-3** angegebenen Anforderungen entspricht. CEM III/B-Zemente gelten als HS-Zemente mit hohem *Sulfatwiderstand* nach DIN 1164-1.

Tafel I.3.1-3: NA-Zemente nach DIN 1164

		Hüttensandgehalt in M.-%	Na_2O-Äquivalent in M.-%
alle Zemente			≤ 0,60
Portlandhüttenzement	CEM II/B-S-NA	21–35%	≤ 0,70
Hochofenzement	CEM III/A-NA	36–49%	≤ 0,95
	CEM III/A-NA	50–65%	≤ 1,10
	CEM III/B-NA	66–80%	≤ 2,00

Puzzolane

Gesteinsmehle vulkanischen Ursprungs, *Trass* oder Sedimentgesteine mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung können mit gelöstem Calciumhydroxid reagieren und erhärtungsfähige Verbindungen bilden. Nach den schon im Altertum verwendeten Tuffen von Pozzuoli bei Neapel nennt man diese Stoffe *Puzzolane*. Ihr Gehalt an reaktionsfähigem CaO ist gering. Das zur Erhärtung der Puzzolane erforderliche gelöste Calciumhydroxid entsteht bei der Zementverarbeitung als Reaktionsprodukt der hydratisierenden Klinkerphasen.

Deutschland verfügt über zwei geologische Trassvorkommen, nämlich dem vulkanischen, rheinischen Tuff der vorderen Eifel und dem durch Meteoriteneinschlag entstandenen bayerischen Trass (Suevit) des Nördlinger Rieses.

In der europäischen Zementnorm sind auch thermisch behandelte, natürliche Puzzolane (z. B. Phonolithe) enthalten, die derzeit nur mit bauaufsichtlicher Zulassung verwendet werden dürfen.

Flugasche

Flugaschen sind feinkörnige Verbrennungsrückstände, die in Elektrofiltern zur Abgasreinigung von Kohlekraftwerken abge-

schieden werden. Sie können je nach Herkunft und chemisch-mineralogischer Beschaffenheit der Braun- bzw. Steinkohle alumo-silicatisch oder silicatisch-kalkhaltig zusammengesetzt sein und besitzen puzzolanische Eigenschaften. Kalkreiche Flugaschen können zudem hydraulische Eigenschaften aufweisen.

In Deutschland wird der überwiegende Teil der heute in der Baustoffindustrie eingesetzten Steinkohlenflugasche bei der Betonherstellung zugesetzt. Als Zementhauptbestandteil spielt Steinkohlenflugasche (SFA) derzeit keine Rolle. SFA fallen aufgrund ihres geringen Gehalts an reaktionsfähigem CaO von unter 5 M.-% und ihres Anteils an reaktionsfähigem SiO_2 von mindestens 25 M.-% in die Kategorie der kieselsäurereichen Flugaschen. Ihr Glühverlust, bestimmt nach DIN EN 196-2, darf höchstens 5 M.-% betragen. Mit diesem Kriterium wird der Gehalt an porösen, unverbrannten Kokspartikeln in der Flugasche kontrolliert.

Die Verbrennungstemperaturen von Steinkohle liegen je nach Feuerungsart zwischen etwa 800 und 1700 °C. Ein beträchtlicher Teil der Verbrennungsrückstände kann bei höheren Feuerraumtemperaturen aufgeschmolzen werden und glasig erstarren. Geschieht das Erstarren noch im Flug, so entstehen kugelförmige Glaspartikel. Diesen glasigen Bestandteilen wird der wesentliche Anteil an puzzolanischer Reaktionsfähigkeit zugeschrieben.

In der Regel liegen die Feinheiten von Steinkohlenflugaschen aus deutschen Kraftwerken zwischen etwa 2 700 und 5 300 cm^2/g nach Blaine. Durch die Ergänzung bzw. Verbesserung der Kornverteilung von Beton-Zuschlagstoffen im Feinstbereich sowie durch die überwiegend kugelige Kornform von Steinkohlenflugaschen (s. **Bild I.3.1-3**) wird die Verarbeitbarkeit von Betonen mit *Portlandflugaschezement* günstig beeinflusst [Ric1]. Von Nachteil ist eine erhöhte Porosität von SFA, die zu einem Anstieg des Wasseranspruchs führt.

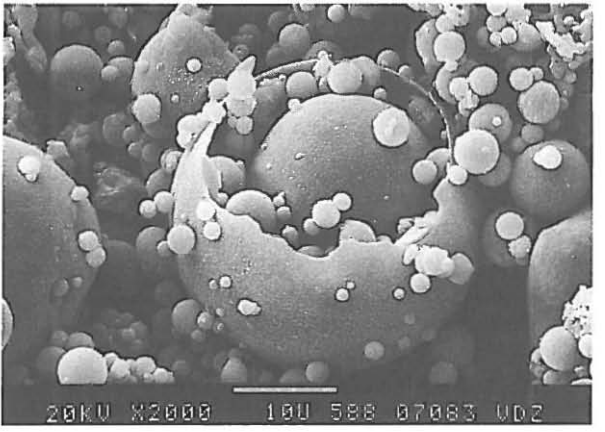


Bild I.3.1-3: Kornform von Steinkohlenflugaschen im Rasterelektronenmikroskop

Neben der physikalischen Wirkung können die puzzolanischen Eigenschaften von Steinkohlenflugaschen eine zusätzliche Gefügeverdichtung im erhärtenden Beton herbeiführen. Da puzzolanische Reaktionen verhältnismäßig langsam im Vergleich zu den hydraulischen Reaktionen der Zementklinkerphasen ablaufen, tritt dieser Einfluss von Steinkohlenflugaschen erst mit zunehmender Hydratationszeit in den Vordergrund. Die Nutzung der puzzolanischen Reaktion erfordert jedoch eine besonders sorgfältige Nachbehandlung.

Die in deutschen Kraftwerken anfallenden Braunkohlenflugaschen entsprechen in der Regel nicht den Anforderungen der Zementnorm an kieselsäurereiche Flugaschen. Sie werden derzeit nicht als Zementhauptbestandteil genutzt. Nach prEN 197-1

wären deutsche Braunkohlenaschen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als kalkreiche Flugaschen einzustufen, sofern ihr Massenanteil an reaktionsfähigem CaO 10 M.-% übersteigt und die Aschen weitere Anforderungen an die Zusammensetzung und an ihren Festigkeitsbeitrag durch Puzzolanität erfüllen.

Gebrannter Schiefer

Die Verwendung von Ölschiefer zur Zementherstellung konzentriert sich auf die Region um Dotternhausen (Baden-Württemberg). Ölschiefer ist bituminöser, kalkhaltiger Schiefer mit einem durchschnittlichen Gehalt an organischer Substanz von ca. 11 M.-%. Weitere Hauptbestandteile sind Calciumcarbonat (ca. 41 M.-%), Tonmineralien (ca. 21 M.-%) und Quarz (ca. 12 M.-%). Er wird in Deutschland nur an der Nordwestflanke der Schwäbischen Alb abgebaut.

Ölschiefer kann beim Klinkerbrennprozess als fossiler Energieträger wie als Tonkomponente eingesetzt werden. Durch Brennen des Ölschiefers bei rund 800 °C in der Wirbelschicht entsteht daraus ein Bindemittel, das sowohl hydraulische als auch puzzolanische Eigenschaften aufweist. Die dabei freigesetzte Verbrennungswärme wird zur Stromerzeugung genutzt.

Der gebrannte Ölschiefer enthält als hydraulische und puzzolanische Bestandteile Dicalciumsilicat, verschiedene Calciumaluminate und aktives Siliciumdioxid (Kieselsäure). Mit einer Eigendruckfestigkeit gemäß DIN EN 196-1 von mindestens 25 N/mm² nach 28 Tagen wird der gebrannte Ölschiefer als Hauptbestandteil zur Herstellung von *Portlandölschieferzement* (CEM II-T) aller Festigkeiten verwendet. Eine Sonderregelung für den oberen Grenzwert des Sulfatgehalts berücksichtigt den $CaSO_4$-Gehalt in gebranntem Ölschiefer.

Kalkstein

Kalkstein, der als Hauptbestandteil im Zement verwendet wird, muss den in DIN 1164-1 festgelegten Anforderungen genügen, um einen ausreichend hohen Frostwiderstand des Zements im Beton sicherzustellen.

Der $CaCO_3$-Gehalt des Kalksteins darf 75 M.-% nicht unterschreiten. Der Gehalt an organischer Substanz (TOC) ist auf maximal 0,2 M.-% begrenzt.

Der Einfluss des Kalksteinmehls auf die Zementeigenschaften beruht im Wesentlichen auf einer Füllerwirkung. Die Korngrößenverteilung von Portlandkalksteinzement ist meist breiter als die von Portlandzement. Dementsprechend besitzen *Portlandkalksteinzemente* verbesserte Verarbeitungseigenschaften. Die gesteigerte Hohlraumfüllung durch den erhöhten Anteil feiner Kalksteinpartikel führt außerdem zu einer hohen Dauerhaftigkeit von Beton.

Silicastaub

Die prEN 197-1 lässt auch den Einsatz von *Silicastaub* als Hauptbestandteil von Zementen (CEM II/A-D) zu. Derzeit wird jedoch Silicastaub in Deutschland nur als Betonzusatzstoff eingesetzt (s. Abschnitt II.2.2).

3.2 Verfahrenstechnik

3.2.1 Klinkerherstellung

Die industrielle Herstellung des Massenbaustoffs Zement hat sich zu einem bedeutenden Gebiet der modernen Verfahrenstechnik entwickelt, das vom Gewinnen der Rohstoffe bis zum Verladen des fertigen Produkts viele Grundverfahren umfasst. Wie auch in anderen Zweigen der Grundstoffindustrie war die technologische Entwicklung der letzten Jahre unter dem Druck

ständig wachsender Anforderungen und Kosten vor allem durch die Modernisierung bestehender Anlagen und den Neubau von spezifisch kostengünstigeren Großanlagen gekennzeichnet.

Dabei standen sowohl prozessintegrierte Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes als auch die Einführung von Prozessleitsystemen sowie von Automatisierungsvorgängen im Vordergrund, um den Anforderungen an die Qualität des Zements, vor allem an die Gleichmäßigkeit der Zementeigenschaften gerecht zu werden.

Durch den im Vergleich zu anderen Industrien sehr hohen Anteil der Energiekosten an den gesamten Herstellkosten sowie der im Jahr 1995 eingegangenen *Selbstverpflichtung* der Zementindustrie, ihren thermischen *Energieverbrauch* von 1987 bis zum Jahre 2005 um 20% zu senken, stellt die Energieeinsparung nach wie vor eine bedeutende technische und gesellschaftspolitische Aufgabe dar.

Der nachfolgende Abriss beschränkt sich auf die *Herstellung des Zementklinkers*, das gemeinsame Vermahlen mit Gips und/oder Anhydrit, ggf. mit anderen Hauptbestandteilen sowie das getrennte Mahlen und anschließende Mischen der Hauptbestandteile. Schematisch ist der Verfahrensablauf in einem Zementwerk in **Bild I.3.2-1** dargestellt.

Gewinnen der Rohstoffe

Die wichtigsten *Zementrohstoffe* Kalkstein, Ton und ihr natürliches Gemisch, der Kalksteinmergel, werden in Steinbrüchen hauptsächlich durch Sprengen gewonnen. Bei einer Sprengung fallen je nach Werksgröße und Bedarf Gesteinsmengen bis 50 000 t oder mehr an. Das Gestein wird mit Hochlöffelbaggern oder Rad-Schaufelladern auf Schwerlastwagen von 20 bis 80 t Fassungsvermögen verladen. Die Fahrzeuge befördern das groß-

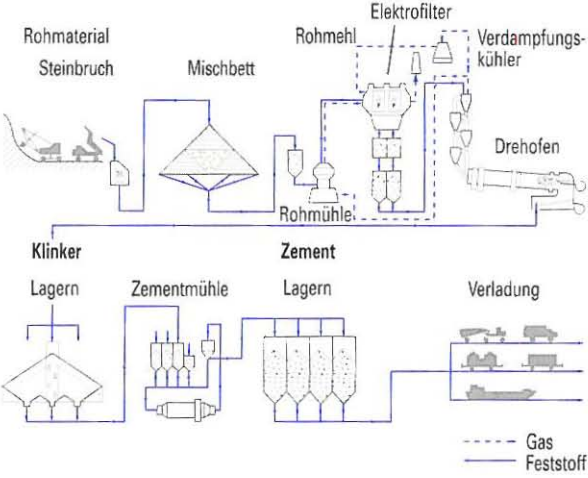


Bild I.3.2-1: Schematischer Verfahrensablauf im Zementwerk

stückige Rohmaterial zu Hammerbrechern, in denen es zu Schotter von etwa 30 mm Kantenlänge gebrochen wird. Heute setzt man oft auch ortsbewegliche Brecher auf Raupenfahr- oder Schreitwerken ein, die mit den Baggern der Abbaufront folgen können. Der Schotter kann dann auf Bandförderern vom Bruch in die Fabrik transportiert werden. Maßgebend für die Wahl des Verfahrensablaufs sind die Förderkosten.

Geeignetes lockeres Gestein wird auch ohne Sprengen von schweren Raupen mit Reißzähnen aufgerissen und dem Bagger zugeschoben. Kreide und Ton lassen sich mit Eimerketten-, Schaufelrad- oder Schürfkübelbaggern unmittelbar von der Bruchwand abtragen.

Als wesentliche Voraussetzung für die Güte und Gleichmäßigkeit des Zements muss die zur Klinkerherstellung erforderliche Zusammensetzung des ofenfertigen Rohguts genau und gleich bleibend eingehalten werden. Wenn die Lagerstätten größere Schwankungen in ihrer chemischen Zusammensetzung aufweisen, wird vielfach schon der Rohschotter vorhomogenisiert. Hierfür werden nacheinander zwei oder mehrere rechteckige oder kreisförmige Vorratslager („Mischbetten") schichtweise nach unterschiedlichem Muster aufgeschüttet. Die Halden fassen in der Regel den Schottervorrat für eine Woche, das sind je nach Werksgröße zwischen 20 000 bis 80 000 t. Die jeweils fertige Halde wird quer zu den Schichten wieder abgetragen. Mit diesen „Mischbetten" lassen sich Vergleichmäßigungsgrade von rd. 70 bis 90% erzielen und demnach Schwankungen des Vorkommens bereits weitgehend ausgleichen. Gleichzeitig kann mit Hilfe einer laufenden Probenahme oder modernster kontinuierlicher Messtechnik beim Aufbau der Halde die durchschnittliche chemische Zusammensetzung dadurch gesteuert werden, dass Rohmaterial von bestimmten Stellen des Steinbruchs oder von vorbereiteten Korrekturmateriallagern gezielt auf das Mischbett gefahren wird.

Aufbereiten des Rohmaterials

Das Rohmaterial wird in Deutschland nahezu ausschließlich trocken aufbereitet; an einem Standort werden die Einsatzstoffe lagerstättenbedingt nass aufbereitet.

Bei der *trockenen Aufbereitung* werden die Rohmaterialkomponenten über genau geregelte Dosiereinrichtungen einer Mühle in bestimmten Mischungsverhältnissen aufgegeben und zu Rohmehl feingemahlen. Mitunter werden Korrekturkomponenten wie Quarzsand oder Eisenerz zugesetzt, um die erforderliche chemische Zusammensetzung des Rohmehls einzustellen. Auch

stoffe möglichst gut auszunutzen und die Zementeigenschaften zu optimieren. Die mehlfeinen Vorprodukte werden getrennt gelagert. Daher treten bei Sortenwechsel keine sogenannten „Übergangsqualitäten" auf.

Bei geeigneter Wahl der Vorprodukte besteht außerdem die Möglichkeit, durch unterschiedliche Dosierung beim Mischen mehrere Zementsorten herzustellen. Damit ergibt sich ein hohes Maß an betrieblicher Flexibilität.

Zum Mischen mehlfeiner Stoffe können sowohl mechanisch arbeitende *Chargenmischer* als auch *Durchlaufmischer* eingesetzt werden. Dabei versteht man unter einem mechanisch arbeitenden Chargenmischer z. B. einen mit Schaufeln ausgerüsteten Doppelwellen-Zwangsmischer mit etwa 3,0 bis 5,0 m Länge, 2,5 bis 4,0 m Breite und 2,0 bis 3,0 m Höhe. Das Volumen des Mischertrogs liegt zwischen etwa 4 und 8 m^3. Die mehlfeinen Stoffe werden dem Mischer über mehrere Dosiereinrichtungen getrennt aufgegeben. Das gemischte Gut wird aus dem Mischer z. B. in eine Druckgefäßförderanlage entleert und in Silos gefördert. Mit etwa 20 bis 35 Mischspielen pro Stunde erreichen die Mischer eine Durchsatzleistung von bis zu 200 t/h.

Mechanische Durchlaufmischer sind Pflugscharmischer mit etwa 1,0 m Durchmesser und 2,5 m Länge und einem Trommelinhalt von rd. 1,0 bis 2,5 m^3. Die mehlfeinen Einsatzstoffe werden getrennt dosiert dem Mischer zugeführt. Durch einen Stellschieber am Mischerausgang kann der Mischgutfüllungsgrad im Mischer zwischen etwa 25 und 75% eingestellt werden. Im kontinuierlichen Betrieb kann der Durchsatzmassenstrom in der Größenordnung von 50 bis 100 t/h liegen. Das im einmaligen Durchlauf fertig gemischte Gut wird in Silos gefördert.

3.2.4 QM-Systeme bei der Zementherstellung

Die Sicherung der *Qualität* der hergestellten Zwischen- und Endprodukte durchzieht den gesamten Prozess der Zementherstellung. Die jeweiligen Steuerungsmechanismen für die Teilprozesse der Rohmaterialgewinnung und -aufbereitung, des Klinkerbrennprozesses sowie der Zementmahlung sind in den jeweiligen Abschnitten angesprochen. Wesentliches Ziel dieser Steuerungsmechanismen ist, Produkte mit gleich bleibend hoher Qualität mit einem möglichst niedrigen Energieaufwand unter ökologischen und wirtschaftlichen Bedingungen herzustellen.

Die *Qualitätssicherung* im Zementwerk beginnt daher bereits vor dem Aufschluss eines neuen Steinbruchs. Durch eine gezielte Untersuchung der abbauwürdigen Vorkommen lässt sich ein dreidimensionales – heute häufig computerunterstütztes – chemisch-mineralogisches Modell des Abbauvorkommens abbilden. Durch eine gezielte Abbauplanung und erste Mischung der Rohstoffe im Brecher des Steinbruchs erfolgt die Einstellung der Zusammensetzung der Rohstoffe. Der gebrochene Schotter wird – so weit erforderlich – in Mischbetten vorhomogenisiert. Die Feinmahlung der Rohstoffe in der Rohmühle erfolgt heute vollständig computergesteuert, wobei die Zusammensetzung des ermahlenen Rohmehls sowie dessen Feinheit als Zielgrößen dienen. So weit erforderlich wird das ermahlene Rohmehl dann in Homogenisiersilos weiter vergleichmäßigt, bevor es dem Klinkerbrennprozess aufgegeben wird. Der Klinkerbrennprozess selbst erfolgt heute weitgehend automatisiert, zum Teil unter Verwendung so genannter *Ofenführungssysteme*. Bei entsprechender Einrichtung ermöglichen diese Ofenführungssysteme eine deutliche Vergleichmäßigung des Klinkerbrennprozesses und damit der Zusammensetzung und Eigenschaften des erbrannten Klinkers. In so genannten *Expertensystemen* werden

Sekundärrohstoffe werden meist der Rohmühle zugegeben, um eine optimale Vermischung mit den anderen Rohstoffen zu erzielen.

Während des Zerkleinerns wird das Mahlgut mit Heißgas getrocknet, das durch die Mahlanlage gesaugt wird. Im Allgemeinen wird hierfür der Wärmeinhalt der Abgase des Ofensystems genutzt. Damit lässt sich je nach Bauweise der Mahlanlage Rohmaterial mit 8 bis 12 M.-% Feuchte trocknen. Bei höheren Gutfeuchten wird ein Teil der Kühlerabluft mitverwendet oder eine zusätzliche Feuerung zur Heißgaserzeugung eingesetzt. Sehr feuchtes Rohmaterial wird z. T. vor der Mahlung in einem Trommeltrockner vorgetrocknet.

Anstelle von *Rohrmühlen*, in denen das Gut durch eine umgewälzte Stahlkugelfüllung gemahlen wird, werden heute zunehmend *Wälzmühlen* zur Rohmaterialmahlung verwendet. Hierin überrollen feststehende Walzen das Gut auf einem sich drehenden Mahlteller. Diese Mühlen haben im Vergleich zu Rohrmühlen einen niedrigeren Energiebedarf, eine höhere Trocknungsleistung, einen einfacheren Aufbau und können ein gröberes Aufgabegut verarbeiten. Ferner emittieren sie weniger Lärm und – bei bestimmten Betriebszuständen – auch weniger Staub. Bei stark schleißenden Materialien sind ihre Einsatzmöglichkeiten aber begrenzt. Große Wälzmühlen ermahlen heute stündlich bis zu 500 t Rohmehl und haben einen Energiebedarf von etwa 10 bis 16 kWh/t Rohmehl.

Die Kreide an der Unterelbe wird aufgrund ihres Feuchtegehalts in Schlämmtrommeln aufgeschlämmt. Der Schlamm wird in Rührwerke geleitet und dort mechanisch sowie mit Druckluft homogenisiert. Der Rohschlamm wird in Kammerfilterpressen entwässert und in einem Steigrohrtrockner unter Verwendung der heißen Ofenabgase und der Kühlerabluft getrocknet. Durch diese Art der Aufbereitung und Trocknung kann das Rohmaterial

in einer Ofenanlage, die nach dem Trockenverfahren arbeitet, eingesetzt werden. Im vorliegenden Fall wird es dem Zyklonvorwärmer einer modernen Drehofenanlage mit Vorcalcinierung aufgegeben.

Das fertige Rohmehl bzw. der Rohschlamm werden vom Werkslabor in kurzen Abständen analysiert. Mit Hilfe moderner Analysegeräte (z. B. RFA) lassen sich Änderungen der Zusammensetzung schnell erkennen und durch Verstellen der Komponentendosierung aussteuern. Verbleibende Schwankungen im Rohmehl werden in Homogenisiersilos ausgeglichen. Homogenisiersilos werden chargenweise oder im Durchlauf betrieben. Zum Homogenisieren wird das Rohmehl mit Luft fluidisiert und im Fließbett umgewälzt oder mechanisch über mehrere Silos im Kreislauf gefördert. Aus Kostengründen werden jedoch häufig Durchlaufmischsilos bevorzugt, in denen das Rohmehl durch die Bildung von Materialtromben während des Entleerungsprozesses homogenisiert wird. Unterstützt wird dieser Prozess durch das gezielte Belüften verschiedener Bodensektionen des Silos und das Wechseln der Abzugsstelle. Rohschlamm wird mit Rührwerken unter Einblasen von Luft homogenisiert.

Entwicklung der Ofentechnik

Zementklinker wird heute in der Bundesrepublik Deutschland zum überwiegenden Teil (84,8% der genehmigten Klinkerkapazität) nach dem *Trockenverfahren* in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern hergestellt. Darüber hinaus erfolgt die Klinkerproduktion nach dem so genannten *Halbtrockenverfahren* (13,5%), bei dem das Rohmaterial in Form von Pellets in einem Rostvorwärmer erhitzt wird, bevor es im Drehrohr zu Klinker gebrannt wird (Lepolöfen). Das Nassverfahren, bei dem das Rohmaterial dem Ofen als Schlamm mit über 30 M.-% Wasseranteil aufgegeben wird, ist im Zuge von Modernisierungsmaßnahmen be-

Tafel I.3.2-1: Genehmigte Ofenanlagen in Deutschland (für 1970, 1982 alte Bundesländer)

Ofentyp	1970			1982			2000		
	Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität		Anzahl	Kapazität	
		10^3 t/d	%		10^3 t/d	%		10^3 t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	48	53,1	49	51	90,1	71	46	112,5	84,8
Öfen mit Rostvorwärmer	53	36,6	34	30	28,8	23	19	18,0	13,5
Trockenöfen	7	4,5	4	2	1,4	1	1	1,0	0,8
Nassöfen	18	8,8	8	4	2,1	2	–	–	–
Schachtöfen	42	5,5	5	26	3,8	3	8	1,2	0,9
Summe	168	108,5	100	113	126,2	100	74	132,7	100

reits während der 60er- und 70er-Jahre auf das kostengünstigere und energiesparendere Trockenverfahren mit Zyklonvorwärmer umgestellt worden.

0,9% der genehmigten Klinkerleistung entfällt in der Bundesrepublik auf Schachtöfen. Die Entwicklung der genehmigten *Ofenkapazitäten* in Deutschland nach Produktionsverfahren zeigt **Tafel I.3.2-1**.

In Deutschland hat sich die Struktur des Brennverfahrens in einem Zeitraum von mehr als 25 Jahren deutlich verändert. So stieg in den alten Bundesländern der Anteil der energiesparenden Anlagen, die nach dem Trockenverfahren arbeiten (Öfen mit Zyklonvorwärmer), von 1972 bis 1998 von 56% auf 84% (Anteil an der genehmigten Klinkerleistung). Der Anteil der Rostvorwärmeranlagen ging von 30% auf 14% zurück. Öfen, die nach dem Nassverfahren arbeiten, wurden vollständig stillgelegt.

Eine ähnliche Entwicklung hat sich in den neuen Bundesländern allerdings in einem deutlich kürzeren Zeitraum von nur 8 Jahren (1990 bis 1998) vollzogen. Dort werden inzwischen 90% des Zementklinkers in Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmern hergestellt.

Neue Ofenanlagen werden heute ausschließlich als Zyklonvorwärmeröfen mit Calcinator, Tertiärluftleitung und Rostkühler gebaut. Die Drehofenanlagen können im Vergleich zu Anlagen gleicher Leistung ohne Calcinator kleiner dimensioniert und dadurch kostengünstiger errichtet und betrieben werden. Die etwas geringeren Energieverluste, die sich bei diesem Verfahren aufgrund der geringeren Wärmeabstrahlung des Drehofens ergeben, werden bei gleicher Zyklonstufenzahl durch erhöhte Abgasverluste aufgehoben. Allerdings besteht bei Neuanlagen die Möglichkeit, diese Verluste durch den Einbau zusätzlicher Zyklonstufen auszugleichen. Durch die Vorcalcinierung des Brennguts wird ein gleichmäßiger Ofenbetrieb erreicht, der eine wichtige Voraussetzung für einen niedrigen Brennstoffenergieverbrauch ist und gleichzeitig prozessintegriert zur Emissionsminderung beiträgt. Aufgrund der höheren Ofenleistung dieser Anlagen führt der zunehmende Einsatz dieser Technologie darüber hinaus zu einer Energieeffizienzsteigerung.

Zyklonvorwärmer

Die *Zyklonvorwärmer*, die je nach Klinkerkapazität der Ofenanlage in ein- oder zweisträngiger Ausführung gebaut werden, bestehen aus vier bis sechs Zyklon- oder Wirbelkammerstufen, die in 50 bis 120 m hohen Türmen übereinander angeordnet sind und vom Abgas im Gegenstrom von unten nach oben durchströmt werden. Das Rohmehl wird im Steigschacht zur obersten Stufe aufgegeben und in der Strömung schwebend auf die örtliche Gastemperatur erhitzt. Im Zyklon wird es vom Gas

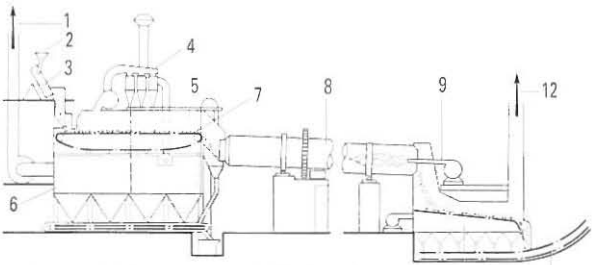
getrennt und in die darunter liegende Stufe abgeschieden. Durch die intensive Vermischung kommt es zu einem sehr guten Wärmeaustausch zwischen Brenngut und Abgas. Der Vorgang wiederholt sich in jeder Stufe bei jeweils höheren Temperaturen, wobei der im Rohmehl enthaltene Kalkstein teilweise entsäuert wird. Die Restentsäuerung findet in einem Calcinator oder in der Calcinierzone des Drehofens statt. Das Abgas verlässt den Vorwärmer mit einer Temperatur von 280 bis 350 °C.

Rostvorwärmer

Ofenanlagen mit *Rostvorwärmer („Lepol"-Öfen)* werden mit Granalien oder Pellets beschickt. In Deutschland arbeiten diese Anlagen nach dem *Halbtrockenverfahren*, bei dem Pellets aus Rohmehl und Wasser auf Granuliertellern hergestellt werden.

Das Brenngut wird dem Drehrohr auf einem Wanderrost zugeführt und dabei von den Abgasen im Querstrom in einer Trockenkammer und einer Heißkammer, die durch eine Trennwand voneinander getrennt sind, bis auf Calcinierungstemperaturen erhitzt (s. **Bild I.3.2-2**). Das aus dem Ofen kommende 1100 bis 1200 °C heiße Abgas wird in der Heißkammer von oben durch die Pelletschicht gesaugt. Anschließend wird das auf ca. 250 bis 300 °C abgekühlte Gas in Zyklonen vorentstaubt und von oben in die Trockenkammer eingeleitet. Nach abschließender Trocknung der Pellets verlässt das Abgas mit einer Temperatur zwischen 90 und 150 °C den Vorwärmer und wird nach der Entstaubung über einen Kamin abgeleitet. Rostvorwärmeröfen wurden für Tagesleistungen von bis zu 3300 t Klinker gebaut.

Das Halbnassverfahren, für das Rohschlamm in mechanischen Filterpressen entwässert wird und mit Siebknetern zu strangförmigen Formlingen gepresst wird, findet in Deutschland keine Anwendung mehr.



1 Abgas zur Entstaubung
2 Aufgabegut
3 Granulierteller
4 Zwischengasentstaubung
5 Heißkammer
6 Trockenkammer
7 Wanderrost
8 Drehofenrohr
9 Brenner
10 Rostkühler
11 Klinkerförderer
12 Heißluftverwertung

Bild I.3.2-2: Drehofenanlage mit Rostvorwärmer (Lepol-Ofen)

Verfahrensbedingt haben Öfen mit Rostvorwärmer zur Trocknung des Brennguts einen höheren thermischen Energiebedarf als Öfen mit Zyklonvorwärmer. Zum Teil konnten Öfen mit Rostvorwärmer allerdings betriebstechnisch und energetisch so weit optimiert werden, dass ihr spezifischer Energiebedarf dem von Zyklonvorwärmeröfen vergleichbar ist. Ein Umbau von Öfen mit Rostvorwärmer auf Zyklonvorwärmeranlagen ist mit sehr hohen Investitionen verbunden und nicht wirtschaftlich durchführbar. Die Abnahme der Zahl der Öfen mit Rostvorwärmer in den vergangenen Jahren ist vor allem auf den Ersatz durch neugebaute Zyklonvorwärmeröfen zurückzuführen.

Drehofenanlagen mit Vorcalcinator

Die Weiterentwicklung der Zyklonvorwärmeröfen konventioneller Bauart führte seit 1966 zur Einführung der *Vorcalcinier-*

die Kenntnisse erfahrener Leitstandsfahrer verwertet und in Regelalgorithmen umgesetzt. Die Verwendung computergestützter Regelalgorithmen ermöglicht dabei deutlich kürzere Stellzeiten und kleinere Stellschritte, als dies bei einer menschengeführten Steuerung möglich ist. Gelegentlich auftretende instationäre Betriebszustände können allerdings nicht von solchen Systemen abgedeckt werden. Als Führungsgrößen dienen zum Beispiel der Freikalkgehalt des Klinkers, die Sinterzonentemperatur sowie der Sauerstoffgehalt und die NO_x-Konzentration im Ofenabgas.

Der fertiggebrannte Klinker wird im Klinkersilo durch eine entsprechende Lagertechnik weiter homogenisiert. Die Zementmahlung bzw. die Mahlung einzelner Hauptkomponenten sowie der folgende Mischprozess sind heute ebenfalls weitgehend automatisiert und elektronisch gesteuert. Da die in der Norm vorgegebene Sollgröße für die Zementqualität, die 28-Tage-Festigkeit, nicht als direkte Führungsgröße für die Regelprozesse einsetzbar ist, werden Ersatzgrößen, wie z. B. die Mahlfeinheit, sowie Ergebnisse verschiedener Schnelltests verwendet. Die Ergebnisse dieser Analysen wiederum dienen als Regelgrößen für die Mühlensteuerungssysteme.

Die Maßnahmen zur Sicherung der Zementqualität sind heute in allen Zementwerken in *Qualitätssicherungssystemen* organisiert, die sich an der DIN 1164-2 bzw. der Normenreihe DIN EN ISO 9000 orientieren. Neben den konkreten Vorgaben zur Prozesssteuerung sowie zur Überwachung der Zwischen- und Endprodukte umfassen QM-Systeme nach DIN EN ISO 9000 auch Maßnahmen zur Verbesserung der Organisationsstruktur und der Produktionsabläufe insgesamt. Damit sind sie auch Führungsinstrumente, die über die reine Qualitätssicherung hinausgehen.

3.3 Umweltvorsorge

3.3.1 Emissionen

Zementwerke sind genehmigungsbedürftige Anlagen im Sinne der Umweltgesetzgebung und unterliegen dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. Vor 40 bis 50 Jahren war die Umgebung von Zementwerken geprägt durch die Staubemissionen des Produktionsprozesses. Durch hohe Investitionen in Abgasreinigungsanlagen sowie in den produktionsintegrierten Umweltschutz hat die Zementindustrie die Emissionssituation ihrer Werke und damit auch die Immissionssituation in deren Umgebung drastisch verbessert.

Bei der Zementherstellung können luftgetragene Emissionen sowie Lärm und Erschütterungen auftreten. Gas- und staubförmige Emissionen entstehen vor allem beim Klinkerbrennprozess, während Staubemissionen auch von den Mahl- und Trocknungsprozessen sowie von einer Anzahl kleiner Quellen, wie z. B. Siloabsaugungen, herrühren. Lärmemissionen entstehen bei Brenn- und Mahlprozessen sowie durch Verkehr, während Erschütterungen vor allem durch Sprengungen im Steinbruch ausgelöst werden können. Alle genannten *Emissionen* sind in entsprechenden Verordnungen geregelt und begrenzt.

Staubemissionen

Die wesentlichen gefassten Staubquellen in Zementwerken sind das Ofen- bzw. Rohmühlenabgas sowie die Abluft von Klinkerkühlern, Zementmühlen und Trocknungsanlagen. Daneben gibt es in Zementwerken eine Vielzahl kleinerer Quellen, wie z. B. Absaugeeinrichtungen für Silos, Transportbänder und Materialübergabestellen. Diffuse *Staubemissionen* können z. B. bei der offenen Lagerung von Stoffen beim Rohstoffabbau im Steinbruch

technik. Die Vorcalciniertechnik veränderte die Verfahrenstechnik der Klinkerherstellung maßgeblich. Die Vorteile liegen in den niedrigen spezifischen Investitions- und Betriebskosten, hoher Produktionskapazität, gleichmäßiger Prozessführung und zusätzlichen Möglichkeiten zur Emissionsminderung.

Die größten Ofenanlagen mit Vorcalciniertechnik leisten heutzutage 8000 bis 10 000 t Klinker je Tag. Der größte Zyklonvorwärmerofen in Deutschland verfügt derzeit über eine genehmigte Klinkerkapazität von 5000 t Klinker pro Tag.

Bei der Vorcalcinierung wird das aus der zweituntersten Zyklonstufe austretende Heißmehl von aus dem Drehofen aufströmendem Heißgas mitgerissen und in den Calcinator geführt, der zwischen Zyklonvorwärmer und Drehofen angeordnet ist. Dabei handelt es sich um einen Schacht, in dem Ofengas und Brenngut im Gleichstrom geführt werden und intensiv miteinander reagieren. Das Ofenabgas wird schlagartig von etwa 1100 bis 1200 °C auf die Entsäuerungstemperatur von etwa 830 °C abgekühlt. Um die endotherm ablaufene Entsäuerungsreaktion aufrecht zu erhalten, werden im Calcinator Brennstoffe zugegeben, deren Wärmeeintrag je nach Ofenanlage bis zu 60% des gesamten Brennstoffenergiebedarfs betragen kann (s. **Bild I.3.2-3**). Im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen erhöht sich durch den Calcinator der Vorentsäuerungsgrad des Rohmehls auf über 90%. Im Gegensatz dazu wird beim konventionellen Verfahren die gesamte Energie für die *Entsäuerung* über die Primärfeuerung zugegeben und das Rohmaterial wird lediglich zu 40 bis 50% im Vorwärmer vorentsäuert. Durch die Erhöhung des Vorentsäuerungsgrads kann der Drehofen kleiner ausgelegt bzw. bei gleichen Dimensionen mit höherer Leistung betrieben werden.

Aufgrund des für die Entsäuerung energetisch günstigen Temperaturbereiches von 830 bis 950 °C im Calcinator ermöglicht die Vorcalciniertechnik den flexiblen Einsatz von heizwertarmen,

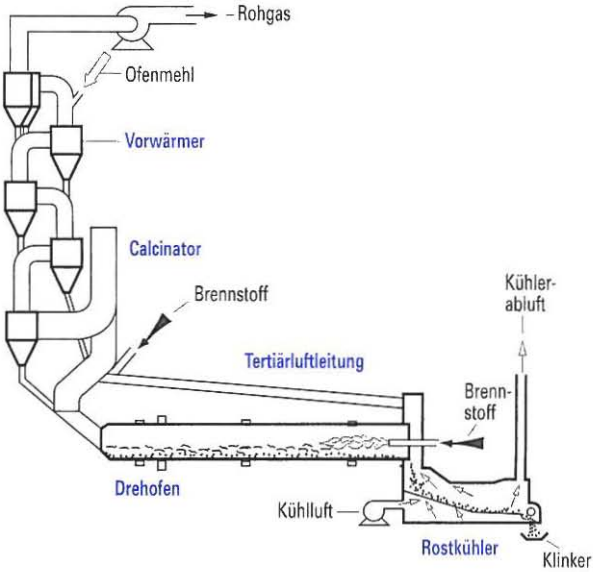


Bild I.3.2-3: Drehofenanlage mit Zyklonvorwärmer und Calcinator

ballastreichen Brennstoffen, wie z. B. aschereiche Kohlen oder bestimmte Sekundärbrennstoffe. Die für die Calcinatorfeuerung erforderliche Verbrennungsluft kann entweder durch den Drehofen oder in einer gesonderten Gasleitung, der so genannten *Tertiärluftleitung,* vom Klinkerkühler zum Calcinator geführt werden. Die Vorcalcinierverfahren werden deshalb in Verfahren mit und ohne Tertiärluftführung unterteilt. Während der Energieanteil der Zweitfeuerung beim Verfahren ohne Tertiärluft auf

ca. 25% beschränkt ist, werden neuere Vorcalcinieröfen nach dem Tertiärluft-Verfahren mit einem Zweitfeuerungsanteil von bis zu 60% ausgelegt.

Seit Ende der 80er-Jahre werden Calcinatoren meist mit einer gestuften Verbrennungsführung ausgestattet, durch die die NO_x-Emissionen der Drehofenanlage vermindert werden können (s. Abschnitt I.3.3.2). Die Calcinatoren unterscheiden sich dabei in ihrer Bauart im Wesentlichen durch den Ort der Brennstoffzugabe, die Art der Aufteilung von Brennstoff, Brenngut und Tertiärluft sowie die geometrische Gestaltung.

Drehrohrofen

Das aus der unteren Zyklonstufe des Vorwärmers austretende Material gelangt in das *Drehrohr* der Ofenanlage. Drehöfen sind unter 3 bis 4% geneigt liegende, feuerfest ausgemauerte Rohre mit Durchmessern bis etwa 6 m, die sich mit 1,3 bis 3,5 Umdrehungen in der Minute drehen. Durch die Drehbewegung und die Neigung der Ofenachse wird das Brenngut vom Ofeneinlauf in Richtung des am Ofenauslauf installierten Brenners bewegt. In der so genannten *Sinterzone* erreicht das Brenngut Temperaturen von etwa 1450 °C, bei einer Gastemperatur bis zu 2000 °C. Die Gasverweilzeit beträgt je nach Ofenlänge 2 bis 4 s bei Temperaturen von mehr als 1200 °C. Die Durchlaufzeit des Materials durch den Ofen beträgt je nach Vorentsäuerungsgrad und Ofendimensionierung 20 bis 40 Minuten.

Die heutigen Öfen mit Zyklon- bzw. Rostvorwärmer verfügen über ein Länge/Durchmesser-Verhältnis von 10 bis 17 und werden heute mit einer Lagerung auf zwei Laufringstationen gebaut. Der Wegfall der bis vor wenigen Jahren üblichen dritten Laufringstation und die im Vergleich zu früheren Ofenanlagen reduzierten Ofenmaße erlauben eine deutliche Verringerung der Investitionskosten. Ein weiterer Vorteil des zweifach gelagerten

Drehofens ist seine statisch bestimmte Lagerung. Überlastungszustände, wie sie bei drei- oder vierfach gelagerten Öfen z. B. durch Fundamentsenkungen oder Ofenrohrverkrümmungen auftreten können, treten bei diesen Drehöfen praktisch nicht auf.

In Deutschland werden heute keine langen Nass- oder Trockenöfen mehr betrieben. Bei diesen drei- bis vierfach gelagerten langen Öfen, die ohne Vorwärmer betrieben werden, beträgt die Länge das 32- bis 35-fache des Durchmessers; das sind bei den größten Einheiten über 200 m. Bei einer Klinkerleistung von bis 3000 t je Tag und darüber zeichnen sie sich durch Einfachheit und große Betriebssicherheit aus. In ihrem oberen Teil haben sie Kettenvorhänge und feste Einbauten, die den Wärmeaustausch verbessern. Neben dem Trockenverfahren werden diese Öfen je nach Rohstoffsituation auch im Nassverfahren betrieben.

Die Verbrennungsluft wird dem Drehofen vor allem als vorgewärmte Luft *(Sekundärluft)* aus dem Klinkerkühler mit Temperaturen von 600 bis 1000 °C zugeführt. Nur ein Anteil von 6 bis 13% wird direkt über den Brenner eingeblasen *(Primärluft)*. Dabei erfordern moderne Brenner einen Brennerluftanteil an der Verbrennungsluft von 6 bis 8% gegenüber herkömmlichen Brennern mit 12 bis 13%. Durch die Verringerung dieses nicht vorgewärmten Verbrennungsluftanteils kann eine Energieeinsparung von 50 bis 80 kJ/kg Klinker erreicht werden.

Die neben den Drehöfen früher weit verbreiteten und bewährten *Schachtöfen* bestehen aus feuerfest ausgemauerten, senkrechten Zylindern von 2 bis 3 m Durchmesser und 8 bis 10 m Höhe. Sie werden von oben mit Pellets aus Rohmehl und feinkörniger Kohle oder Koks beschickt. Das Brenngut durchwandert im oberen, etwas erweiterten Teil des Ofens eine kurze Sinterzone, wird dann von der von unter eingeblasenen Verbrennungsluft gekühlt und verlässt den Ofen am unteren Ende über einen Ausgangsrost als Klinker.

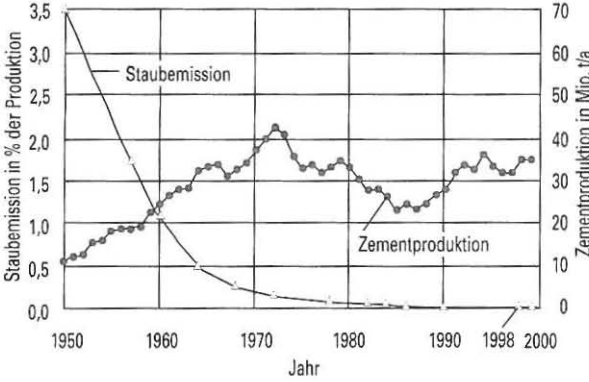


Bild I.3.3-1: Entwicklung der Staubemission und der Zementproduktion der deutschen Zementindustrie (seit 1990 alte und neue Bundesländer)

oder durch Werksverkehr entstehen. Die Staubemissionen der Zementwerke wurden in den vergangenen Jahrzehnten durch den Bau und die Optimierung moderner Filteranlagen erheblich vermindert (s. **Bild I.3.3-1**). Heute liegen die Reingasstaubgehalte von Drehofenanlagen der Zementindustrie zwischen 10 und 50 mg/m^3. Der Beitrag der Zementwerke an der Immissionsbelastung durch Schwebstaub und Staubniederschlag in ihrer Umgebung liegt dadurch im Bereich der Hintergrundbelastung [Sch3].

Staubinhaltsstoffe

Drehrohröfen der Zementindustrie werden durch die Roh- und Brennstoffe neben den Haupt- und Nebenbestandteilen auch *Spurenelemente* (z. B. Schwermetalle) zugeführt. Dieser Eintrag an *Schwermetallen* in das Ofensystem lässt sich nur in sehr

engen Grenzen beeinflussen. Die Spurenelementgehalte in den Rohstoffen können abhängig von der Lagerstätte und dem Abbauort schwanken. Ein gezielter Abbau der Rohstoffe nach ihren Spurenelementgehalten ist jedoch nicht möglich. Beim Einsatz von Korrektur- oder Sekundärstoffen kann durch die Auswahl der eingesetzten Stoffe ein zusätzlicher Eintrag einzelner Schwermetalle in das Ofensystem begrenzt werden [Kir1, Kir2, Kir3].

Die Bedingungen des Klinkerbrennprozesses, es handelt sich im Gegensatz zu reinen Feuerungsanlagen um einen Stoffumwandlungsprozess, führen zu geringen Konzentrationen von Spurenelementen im Reingas. Die mit den Einsatzstoffen in das Ofensystem eingebrachten *nichtflüchtigen Spurenelemente* (z. B. Arsen, Vanadium, Nickel) werden vollständig in den Klinker eingebunden und mit diesem aus dem Ofensystem ausgetragen.

Schwerflüchtige Elemente (wie z. B. Blei und Cadmium) reagieren im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer bevorzugt mit den im Überschuss zur Verfügung stehenden Chloriden und Sulfaten zu schwerflüchtigen Verbindungen. Aufgrund des hohen Oberflächenangebots kondensieren diese Verbindungen bei Temperaturen zwischen 700 und 900 °C an den Brenngutpartikeln. Die im Ofen-Vorwärmersystem gespeicherten schwerflüchtigen Elemente werden so im Zyklonvorwärmer wieder abgeschieden und verbleiben praktisch vollständig im Klinker.

Das Element *Thallium* und seine Verbindungen kondensieren im oberen Bereich des Zyklonvorwärmers bei Temperaturen zwischen 450 und 500 °C, sodass sie zwischen Vorwärmer, Rohmaterialtrocknung und Abgasreinigungsanlage einen Kreislauf ausbilden können.

Das Element *Quecksilber* reagiert zu Verbindungen, die im Bereich von Ofen und Vorwärmer nicht abgeschieden werden. Auf dem Abgasweg findet dagegen infolge der Abkühlung des Gases eine teilweise Kondensation bzw. Adsorption der Quecksilberverbindungen auf den Rohmaterialpartikeln statt. Diese werden teilweise im Ofenabgasfilter abgeschieden und dem Prozess mit dem Rohmehl wieder zugeführt.

Aufgrund des Verhaltens der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungseinrichtungen liegen die Emissionskonzentrationen auf niedrigem Niveau. *Grenzwerte* werden im Allgemeinen deutlich unterschritten. Bei den nichtflüchtigen und schwerflüchtigen Elementen ist zu beachten, dass Einträge in das System generell nur geringe Auswirkungen auf die Emissionen haben. Für Thallium wird das Kreislaufniveau und damit die Emissionskonzentration durch eine Beschränkung der Einträge, aber auch z. B. durch eine gezielte Ausschleusung von Staub aus dem äußeren Kreislauf begrenzt. Gleiches gilt für Quecksilber, das an die Staubpartikel gebunden ist. Zur Verminderung der gasförmigen Emissionen an Quecksilber kann es erforderlich sein, die Einträge in die Ofenanlage über die Roh- und Brennstoffe zu begrenzen.

Stickstoffoxide

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem *Stickstoffoxide* entstehen. Im Abgas von Drehofenanlagen liegen Stickstoffoxide (NO_x) zu einem Anteil von etwa 95% in Form von Stickstoffmonoxid (NO) und zu etwa 5% als Stickstoffdioxid (NO_2) vor. Da NO in der Atmosphäre weitgehend zu NO_2 umgewandelt wird, werden die Emissionen als NO_2 pro m^3 Abgas angegeben.

In der Sinterzone des Drehofens betragen die Brenngutemperaturen etwa 1450 °C; darüber hinaus liegen oxidierende Bedingungen vor. Um diese Brenntemperaturen zu erreichen, sind Flammentemperaturen von bis zu 2000 °C erforderlich. Der Luftüberschuss wird aus Gründen der Klinkerqualität benötigt. Unter diesen Bedingungen überwiegt die teilweise Oxidation des molekularen Stickstoffs der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid (thermische NO-Bildung). Die brennstoffbedingte NO-Bildung durch Oxidation der organischen Stickstoffverbindungen des Brennstoffs ist in der Hauptfeuerung nur von untergeordneter Bedeutung.

Hingegen ist die thermische NO-Bildung bei den Verbrennungsbedingungen in einem Vorcalcinator kaum von Bedeutung, hier kann vielmehr der Einfluss des Brennstoff-NO eine Rolle spielen.

Schwefeldioxid

Schwefel wird dem Klinkerbrennprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sufid und als Sulfat gebunden vorliegen. Sulfate sind vergleichsweise stabile Verbindungen, die mit dem Brenngut in den Ofen gelangen und erst in der Sinterzone teilweise zersetzt werden. Das dabei entstehende SO_2 wird durch die ebenfalls mit Rohstoffen eingetragenen Alkalien gebunden und nahezu vollständig mit dem Klinker aus dem Ofen ausgetragen.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung vollständig zu SO_2 umgewandelt. Dieses SO_2 reagiert ebenso wie das SO_2 aus dem sulfatisch gebundenen Schwefel der Rohstoffe mit den Alkalien zu verhältnismäßig stabilen Alkalisulfaten. Überschüssiges SO_2 wird im Calcinationsbereich der Ofenanlage durch das bei der Entsäuerung des Kalksteins entstandene CaO als $CaSO_4$ gebunden. Diese Sulfate

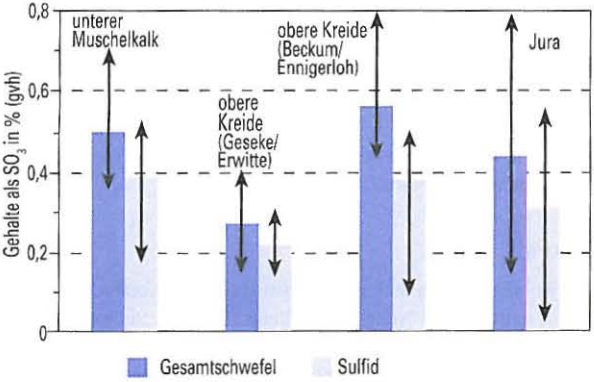


Bild I.3.3-2: Schwefel- und Sulfidgehalt im Ofenmehl

werden mit dem Brenngut wieder in den Ofen geführt und bilden einen Schwefelkreislauf aus, der je nach Höhe des Alkaliüberschusses im Gleichgewicht mit dem Austrag des Schwefels über den Klinker steht.

Ursache höherer *SO_2-Emissionen* von Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmehl enthaltenen, in sulfidisch gebundener (leichtflüchtiger) Form vorliegenden Schwefelverbindungen sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 und 420 °C zu SO_2 oxidiert werden. Die *Sulfide* kommen überwiegend als FeS_2 in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Dies trifft z. B. für die Rohstoffvorkommen im Hannoverschen sowie im Beckumer Raum, aber teilweise auch in den neuen Bundesländern und auf der Schwäbischen Alb zu (s. **Bild I.3.3-2**). Die anderen Rohstoffvorkommen enthalten überwiegend *Sulfate*.

Das aus den Sulfiden in den oberen Zyklonstufen aus dem Rohmaterial freigesetzte SO_2 wird bei der Mahltrocknung teilweise wieder eingebunden und als Sulfit oder Sulfat mit dem Ofenmehl in das System zurückgeführt. Erhöhte SO_2-Emissionen treten deshalb nur bei Ofenanlagen auf, die sulfidhaltige Rohstoffe verarbeiten und insbesondere dann, wenn die Ofenanlage ohne Abgasverwertung betrieben wird.

Chlorid

Die Rohmaterialien und die Brennstoffe des Klinkerbrennprozesses enthalten als Nebenbestandteile *Chloride*. Sie werden beim Verbrennen der Brennstoffe oder dem Erhitzen des Brenngutes freigesetzt und reagieren überwiegend mit den Alkalien aus dem Brenngut unter Bildung von Alkalichloriden. Diese zunächst dampfförmig vorliegenden Verbindungen kondensieren bei Temperaturen zwischen 700 und 900 °C am Brenngut bzw. am Ofengasstaub, gelangen anschließend erneut in den Drehrohrofen und werden wieder verdampft. Dieses ausgeprägte *Kreislaufverhalten* im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer kann zu *Ansatzbildung* führen. Über einen *Bypass* am Ofeneinlauf können Alkalichlorid-Kreisläufe wirkungsvoll reduziert und damit Betriebsstörungen vermindert werden.

Gasförmige anorganische Chlorverbindungen werden beim Klinkerbrennprozess nicht oder nur in sehr geringen Mengen emittiert. Das Auftreten von *Chlorwasserstoff* (HCl) kann im Abgas aufgrund der basischen Ofengasatmosphäre praktisch ausgeschlossen werden.

Kohlenmonoxid und organische Emissionen

Kohlenmonoxid- (CO) und *organische Emissionen* sind bei Energieumwandlungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken, ein Maß für den

Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe. Der Klinkerbrennprozess ist dagegen ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. Aus diesem Grund ist der Brennstoffausbrand vollständig. Die außerdem mit den natürlichen Rohstoffen in geringen Mengen zugeführten organischen Bestandteile sind die Überreste von Organismen und Pflanzen, die im Laufe der Erdgeschichte im Gestein erhalten blieben und sich nicht vollständig zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt haben. Sie werden erst beim Aufheizen des Brennguts ausgetrieben, z. T. zu Kohlenmonoxid bzw. -dioxid oxidiert und zu einem geringen Anteil mit dem

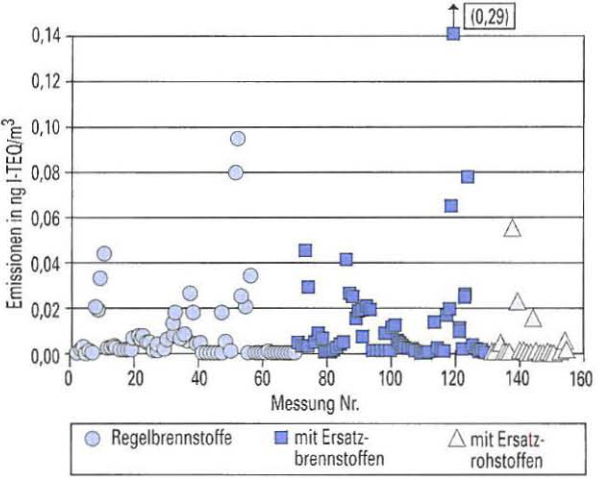


Bild I.3.3-3: Dioxin- und Furanemissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie

Ofenabgas emittiert [Sad1]. Der im Reingas vorliegende Gehalt an Kohlenmonoxid lässt beim Klinkerbrennprozess somit keinen Rückschluss auf die Verbrennungsbedingungen zu.

Die Emissionen hochtoxischer organischer Verbindungen, u. a. *Dioxine* und *Furane*, werden oft zusammen mit dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen diskutiert. Alle vom Forschungsinstitut der Zementindustrie und anderen zugelassenen Messstellen durchgeführten Messungen zeigen jedoch, dass die Emissionskonzentrationen dieser Verbindungen sehr gering sind, und zwar unabhängig von der Wahl des eingesetzten Brennstoffs oder der Ofenfahrweise (s. **Bild I.3.3-3**). Die organischen Bestandteile im Brennstoff werden in der Drehofenfeuerung bei sehr hohen Temperaturen vollständig zerstört [Kuh1]. Darüber hinaus werden im Abgas von Drehofenanlagen – anders als z. B. bei Müllverbrennungsanlagen – so gut wie keine Dioxine und Furane neu gebildet.

Lärm

Zementwerke können je nach Standort in unterschiedlichem Ausmaß zur *Lärmimmission* in ihrer Umgebung beitragen. Ausschlaggebend sind die abgestrahlte Schallleistung sowie der Abstand der Werksanlagen zur benachbarten Wohnbebauung. Aufgrund des ganztägigen Betriebs von Zementwerken werden die *Lärmschutzmaßnahmen* so ausgelegt, dass die strengeren Immissionsrichtwerte für die Nachtzeit jederzeit eingehalten werden.

Wesentliche Geräuschquellen im Bereich eines Zementwerks sind Mühlengebäude, Kamine und Ausblasöffnungen, Filterventilatoren, Ofenantriebe, Gebläse oder Transportbänder sowie der werksinterne Fahrzeugverkehr. Insbesondere über Kaminmündungen können – ohne entsprechende Minderungsmaßnahmen – relevante Schallleistungen aufgrund der hohen Quellhöhe ungehindert, d. h. ohne Abschirmung durch umliegende

Gebäude abgestrahlt werden. Mit Hilfe geeigneter Lärmschutzmaßnahmen lassen sich heute die Geräuschemissionen eines Zementwerks wirkungsvoll vermindern.

Erschütterungen

Die Anregung von Bodenschwingungen durch Gewinnungssprengungen und die Ausbreitung der Erschütterungswelle durch das Erdreich können in der Nachbarschaft von Steinbrüchen zu Beeinträchtigungen führen. *Erschütterungen* von Maschinen oder Anlagen sind hingegen in der Regel nicht relevant. Die Ausbreitung der Erschütterungswelle hängt stark von den geologischen Gegebenheiten ab, darüber hinaus sind die sprengtechnischen Parameter, wie die Art des verwendeten Sprengstoffs, die Lademenge pro Zündzeitstufe, die Vorgaben und der Sprenglochabstand oder die Sprengrichtung für die Stärke der Erschütterungseinwirkung von Bedeutung. Durch geeignete Sprengverfahren lassen sich Erschütterungen durch Gewinnungssprengungen sehr weitgehend vermindern.

3.3.2 Emissionsminderung

Minderung staubförmiger Emissionen

In Deutschland hat sich zur Minderung von Staubemissionen im Ofenabgas der Einsatz von *Elektrofiltern*, in Einzelfällen auch der von *Gewebefiltern*, bewährt. Beide Filterbauarten zeichnen sich durch eine sehr hohe betriebliche Zuverlässigkeit aus. Mit diesen Technologien hat die Zementindustrie in den vergangenen Jahrzehnten ihre staubförmigen Emissionen erheblich verringert. Für alle Staubminderungsverfahren gilt, dass der elektrische Energieaufwand mit abnehmendem Reingasstaubgehalt überproportional ansteigt. Eine weitere Absenkung des heutigen Emissionsniveaus würde deshalb zu einer entsprechenden Erhöhung der energiebedingten CO_2-Emissionen führen.

Der Vorteil der Elektrofilter liegt in ihrem niedrigen Druckverlust. Bei üblichen Reingasstaubgehalten erfordern sie einen niedrigeren elektrischen Energieverbrauch und damit auch niedrigere Betriebskosten als Gewebefilter. Eine sorgfältige Abgaskonditionierung stellt eine hohe Abscheideeffizienz auch bei Betriebsumstellungen, wie z. B. von Direkt- auf Verbundbetrieb, sicher. Elektrofilter müssen bei betriebsbedingten erhöhten CO-Konzentrationen kurzzeitig abgeschaltet werden, was zu einem vorübergehenden Emissionsanstieg führt. Allerdings ist die Zahl der Elektrofilterabschaltungen in den meisten deutschen Zementwerken heute durch betriebliche Optimierungen weitgehend reduziert worden.

Gewebefilter werden in Zementwerken heute vor allem hinter Zementmühlen, Kohlemahlanlagen und vielen kleineren Abgasquellen, in Einzelfällen auch im Ofenabgas, eingesetzt. Die Standzeit und Betriebssicherheit von Gewebefiltern wird durch den Verschleiß der Filterschläuche sowie die Empfindlichkeit gegenüber kurzfristigen Temperaturspitzen begrenzt. Taupunktunterschreitungen können zu einer Kompaktierung der Staubschicht auf dem Filtergewebe führen, wodurch die Gefahr der Verstopfung des Filters erhöht wird. Aus diesen Gründen erfordern Gewebefilter eine größere Aufmerksamkeit im Betrieb sowie einen höheren Aufwand für die Wartung. Dadurch können sich insgesamt höhere Betriebskosten im Vergleich zu Elektrofiltern ergeben.

Zur Begrenzung diffuser Staubemissionen werden partikelförmige Einsatzstoffe und Produkte weitgehend in geschlossenen Lagerhallen oder Silos gelagert.

Alle *Schwermetalle*, mit Ausnahme von Quecksilber, liegen unter üblichen Reingasbedingungen weitgehend in kondensierter Form vor, sodass deren Emissionen vom Staubabscheidegrad der Filteranlage bestimmt werden. Die leichter flüchtigen Elemente

Thallium und Quecksilber können sich in Anlagenbereichen mit niedrigeren Temperaturen anreichern. Aufgrund dessen wird ihr Eintrag über die Rohstoffe und Brennstoffe begrenzt. Zur Emissionsbegrenzung kann es darüber hinaus notwendig sein, voraus bestimmbare Staubmengen aus dem Prozess auszuschleusen. Sinnvoll ist i. d. R. die *Ausschleusung* von aus der Filteranlage abgeschiedenem Rohmehl während des Direktbetriebs, da unter diesen Betriebsbedingungen höhere Konzentrationen im abgeschiedenen Staub vorliegen.

Minderung der NO_x-Emissionen

Zu den *primären, prozessintegrierten Maßnahmen* zur *NO_x-Minderung* zählt in erster Linie eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Ofenbetriebs, die darauf abzielt, die in die Ofenanlage eingetragenen Energieströme zu vergleichmäßigen. Durch eine Homogenisierung der Einsatzstoffe, eine gleichmäßige Dosierung von Roh- und Brennstoffen sowie durch eine entsprechende Regelung des Brennprozesses, z. T. unter Einsatz moderner Ofenführungssysteme, können Prozessschwankungen und damit zeitliche Temperaturspitzen, die eine NO-Bildung begünstigen, vermindert werden. Mit Hilfe der *NO_x-armen Feuerungstechnik* (so genannte Low-NO_x- oder primärluftarme Brenner) werden die Verbrennungsbedingungen in der Flamme günstig beeinflusst und das Temperaturprofil der Drehofenflamme gestreckt, was zu einer verringerten Spitzentemperatur in der Sinterzone führt. Eine große Zahl von Ofenanlagen wurden in den vergangenen Jahren mit dieser neuen *Brennertechnik* ausgerüstet. Allerdings hat sich gezeigt, dass das Minderungspotential durch den Einsatz dieser Brenner geringer ist, wenn andere Primärmaßnahmen an der Ofenanlage bereits erfolgreich umgesetzt wurden. Minderungsraten von 0 bis 30% wurden erreicht [Gaj1].

Bei Drehofenanlagen, die mit *Calcinator* und *Tertiärluftleitung* ausgerüstet sind, lässt sich durch eine geeignete Aufteilung der Brennstoff- und Verbrennungsluftströme eine gestufte Verbrennungsführung realisieren (s. **Bild I.3.3-4**). Durch Zugabe von Brennstoff im Ofeneinlauf oder im unteren Bereich des Calcinators werden bei Luftmangel örtlich reduzierende Zonen geschaffen, die zu einem Abbau des NO im Ofenabgas durch Reduktion führen. Nach der Reduktionsphase wird der Abgasstrom mit Tertiärluft vermischt, um die unter reduzierenden Bedingungen gebildeten Gase auszubrennen. Betriebserfahrungen zeigen, dass mit diesem Verfahren eine NO_x-Minderung von bis zu 50% gegenüber einer ungestuften Fahrweise erreichbar ist.

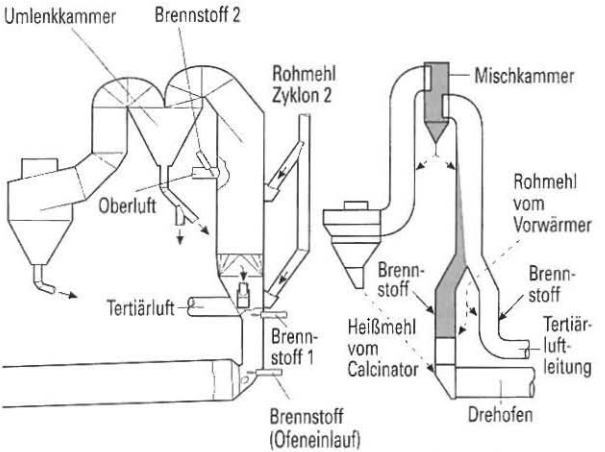


Bild I.3.3-4: Moderne Calcinatoren mit gestufter Verbrennung

Sollten primäre Maßnahmen zur NO_x-Reduktion nicht ausreichen, ist der Einsatz sekundärer Minderungsmaßnahmen erforderlich. Hier bietet sich das *SNCR-Verfahren* an, bei dem durch Zugabe eines *Reduktionsmittels* (meist Ammoniakwasser) im Temperaturbereich zwischen 900 und 1000 °C eine NO-Reduktion erreicht wird. Bei Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer befindet sich dieses Temperaturfenster im Steigschacht zwischen Drehofen und Wärmetauscher. Die Minderungsraten sind abhängig von der Temperatur am Zugabeort, der Verteilung des Reduktionsmittels über den Kanalquerschnitt sowie der Zugabemenge des Reduktionsmittels [Xel1].

Bei der Anwendung des SNCR-Verfahrens kann es zu einem Anstieg von Ammonium- und Ammoniakemissionen durch nicht umgesetztes *Ammoniak* (NH_3) kommen *(NH_3-Schlupf)*, wenn das Reduktionsmittel bei zu niedriger Temperatur zugegeben wird oder ein zu hohes Molverhältnis NH_3/NO eingestellt wird [Sch4]. Obwohl in der TA Luft kein Emissionsgrenzwert für Ammoniak oder Ammoiumverbindungen festgelegt ist, werden die SNCR-Anlagen so betrieben, dass ein möglichst geringer NH_3-Schlupf entsteht.

Minderung der SO_2-Emissionen

Die Verminderung rohmaterialbedingter *SO_2-Emissionen* allein durch verfahrenstechnische bzw. betriebliche Maßnahmen reicht bei vielen Ofenanlagen, die Rohstoffe mit erhöhten Pyritgehalten verarbeiten, nicht aus. Der Betrieb der Ofenanlage im Verbund mit der Mahltrocknung stellt die wirksamste Primärmaßnahme zur *SO_2-Minderung* dar.

Als sekundäre Minderungsmaßnahme wird in Deutschland ausschließlich das so genannte *Trockenadditiv-Verfahren* verwendet. Dabei wird ein Additiv, meist *Kalkhydrat* (Calcium-

hydroxid, $Ca(OH)_2$) entweder mit dem Ofenmehl der obersten Zyklonstufe aufgegeben oder direkt in die Rohgasleitung eingeblasen. Das aus dem Rohmaterial freigesetzte SO_2 wird dabei überwiegend als Sulfit und Sulfat eingebunden. Diese Schwefelmengen erhöhen den *Schwefelkreislauf* in der Ofenanlage, was in einigen Fällen zu Störungen des Anlagenbetriebs infolge verstärkter Ansatzbildung im Ofen oder Steigschacht geführt hat. Diesem Problem kann durch eine Anpassung des Bypassbetriebs entgegengewirkt werden. Bei Ofenanlagen mit Rostvorwärmern kann die Zugabe des Additivs in die Trockenkammer und die Rohgasleitung erfolgen.

Liegen besonders hohe Pyritgehalte in den Rohstoffen vor, die zu einem SO_2-Niveau von deutlich höher als 1200 mg/m³ führen, können andere sekundäre Verfahren, wie die *Nasswäsche* oder das Trockenadditiv-Verfahren mit einer nachgeschalteten zirkulierenden Wirbelschicht zweckmäßig sein. Bisher wurden solche Beispiele nur aus dem europäischen Ausland bekannt.

Lärmminderungsmaßnahmen

Zur Ermittlung der relevanten *Lärmquellen* eines Zementwerks werden üblicherweise so genannte Werkslärmkarten erstellt, aus denen die effektivsten *Lärmschutzmaßnahmen* abgeleitet werden können.

Um die Nachbarschaft vor Lärm abzuschirmen, werden lärmintensive Anlagenteile (z. B. Mühlen) in *schalldämmenden Gebäuden* untergebracht oder mit Schallschutzkapseln bzw. -wänden versehen. Die Außenwände von schalldämmenden Gebäuden bestehen aus Bauelementen, die ein hohes Flächengewicht haben, um die Schallübertragung über die Außenhaut möglichst gering zu halten. Undichtigkeiten der Gebäudeaußenflächen lassen sich vermeiden, wenn Tore und Türen geschlos-

sen gehalten werden. Störende Geräusche von Ventilatoren werden durch den Einbau von *Schalldämpfern* in den Ansaug- und Ausblasöffnungen bekämpft.

Austrittsöffnungen von Kaminen können nicht lärmgedämmt werden. Deshalb werden in den Rohrleitungen zwischen Abgasgebläse und Kamin entsprechende Schalldämpfer eingebaut, wenn die Lärmabstrahlung des Kamins das erfordert. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Lärmschutzmaßnahmen, mit denen die Emissionen kleinerer Quellen vermindert werden können.

Verminderung von Sprengerschütterungen

Erschütterungen durch Gewinnungssprengungen lassen sich durch geeignete *Sprengverfahren* weitgehend vermindern, indem z. B. mehrere Bohrlöcher nicht gleichzeitig, sondern nacheinander in Abständen von Millisekunden gezündet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit der Ladungsteilung je Bohrloch. Die Wahl des Verzögerungsintervalls zwischen der Zündung der einzelnen Teilladungen bestimmt die Wechselwirkungen der Teilladungen einer Reihensprengung untereinander und damit die freigesetzte seismische Energie.

3.3.3 Klimaaspekte

Beim Klinkerbrennprozess werden *klimarelevante Gase* emittiert. Die bei der Zementherstellung auftretenden *CO_2-Emissionen* sind zum einen energiebedingt; sie werden bei der Verbrennung der Brennstoffe sowie indirekt durch den Einsatz an elektrischer Energie freigesetzt. Rohstoffbedingte CO_2-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins. Andere klimarelevante Gase, wie z. B. *Distickstoffoxid* (N_2O) oder *Methan* (CH_4) werden nicht oder nur in sehr geringem Maße emittiert.

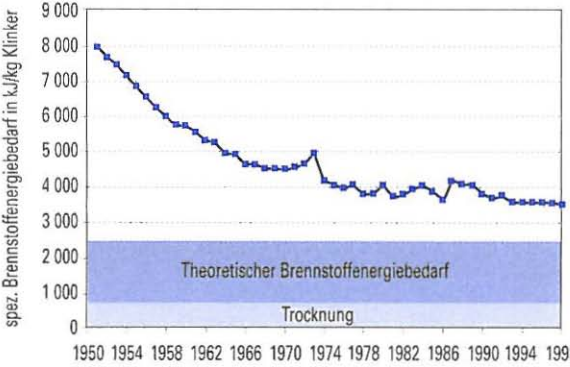


Bild I.3.3-5: Spezifischer thermischer Energieeinsatz (bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit anderen energieintensiven Industriebranchen verpflichtet, ihren Beitrag zum *Klimaschutz* zu leisten und ihren spezifischen *Brennstoffenergieverbrauch* von 1987 bis 2005 um 20% zu senken. Aufgrund des hohen Anteils der Energiekosten an den Herstellkosten für Zement ist die Zementindustrie seit jeher bemüht, den Bedarf an Brennstoffen und elektrischer Energie zu reduzieren. **Bild I.3.3-5** zeigt die Entwicklung des spezifischen thermischen Energieverbrauchs in der Zementindustrie von 1950 bis 1998. Ab dem Jahr 1987 sind darin die neuen Bundesländer enthalten. Wie **Bild I.3.3-6** zeigt, hat vor allem die Modernisierung der Zementstandorte in den neuen Bundesländern nach 1990 zu einer deutlichen Abnahme des spezifischen Brennstoffenergieverbrauchs beigetragen.

Zur Erreichung ihres Minderungsziels verfolgt die Zementindustrie verschiedene Wege:

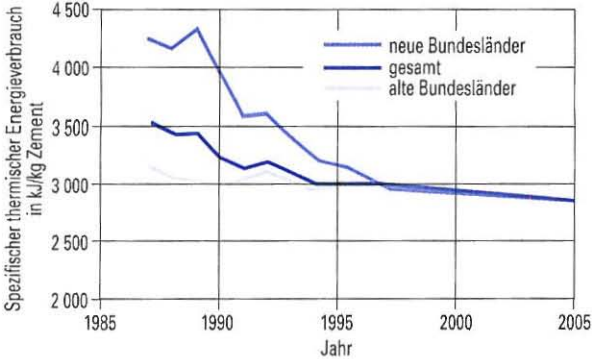


Bild I.3.3-6: Spezifischer thermischer Energieeinsatz in den alten und neuen Bundesländern

- die verfahrenstechnische Optimierung der Ofen- und Mahlanlagen,
- die zunehmende Substitution fossiler Brennstoffe durch Sekundärbrennstoffe sowie
- einen verstärkten Einsatz weiterer Hauptbestandteile wie Hüttensand oder Kalkstein bei der Zementherstellung.

Wie eine vom Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführte Abschätzung zeigt, beträgt das theoretisch erreichbare *Minderungspotential* verfahrenstechnischer Optimierungen nur noch ca. 9%, bezogen auf die angestrebte Gesamtminderung. Bei diesen Berechnungen wurde jedoch zugrunde gelegt, dass abgesehen von den Neuanlagen sämtliche bestehenden Ofenanlagen auf der „grünen Wiese" neu gebaut und dann mit einem von ihrer Ofenkapazität abhängigen optimalen Energieverbrauch betrieben würden. Somit ist das verfahrenstechnische Potential zur Energieverbrauchsminderung heute praktisch

erschöpft. Die zukünftigen Anstrengungen konzentrieren sich daher auf die Substitution fossiler Brennstoffe sowie die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen.

Die aus dem Brennstoffverbrauch resultierenden CO_2-Emissionen betrugen im Jahr 1998 bundesweit 0,221 t CO_2/t Zement oder 7,66 Mio. t/a [VDZ1]. Hierin sind die CO_2-Emissionen aus dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen nicht berücksichtigt. Solche Abfälle substituieren beim Klinkerbrennprozess heizwertäquivalent fossile Brennstoffe und führen daher aufgrund ihres Kohlenstoffgehalts nicht an anderer Stelle zu CO_2-Emissionen. Entsprechend werden die CO_2-Emissionen durch den Einsatz der Sekundärbrennstoffe im Zementwerk insgesamt reduziert.

Der *elektrische Energiebedarf* macht etwa 10% des gesamten Energieverbrauchs der Zementwerke aus. Als Primärenergie gerechnet ist der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs und damit der CO_2-Emissionen, die sich aus dem Einsatz ergeben, größer. Die durch den Stromverbrauch bedingte CO_2-Emission betrug im Jahr 1998 0,07 t CO_2/t Zement oder 2,43 Mio. t/a.

Die je Tonne produzierten Klinkers erzeugte rohstoffbedingte CO_2-Emission hängt von der Rohstoffrezeptur ab, variiert aber nur in geringem Maße. Sie beträgt ca. 0,53 t CO_2/t Klinker oder derzeit ca. 0,443 t CO_2/t Zement. Für 1998 ergab sich für die deutschen Zementwerke eine rohstoffbedingte CO_2-Emission von ca. 12,8 Mio. t/a.

3.4 Arbeitssicherheit

Die Verbesserung der *Arbeitssicherheit* in den Werken der Zementindustrie gehört zu den satzungsgemäßen Aufgaben des

VDZ. Die Entwicklung und Einleitung von Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit werden vom VDZ-Ausschuss „Verfahrenstechnik" wahrgenommen, der in seiner Arbeit durch den Arbeitskreis „Arbeitssicherheit" und das Forschungsinstitut unterstützt wird. Darüber hinaus befasst sich der VDZ mit dem Schutz des Menschen vor arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren beim Umgang mit Zement, z. B. der durch Chromat ausgelösten allergischen Hautkrankheit. In einem Sicherheitsdatenblatt werden die dafür relevanten Daten zusammengefasst.

3.4.1 Herstellung von Zement

Jährlich werden drei Sicherheits-Merkblätter mit den Beschreibungen besonders bemerkenswerter Betriebsunfälle sowie drei Sicherheits-Prüflisten für die Überprüfung von Sicherheitseinrichtungen und -maßnahmen in verschiedenen Arbeitsbereichen herausgegeben. Seit mehr als 23 Jahren werden jährlich die Werke mit den niedrigsten Unfallhäufigkeitsraten im Rahmen eines Arbeitssicherheits-Wettbewerbs ausgezeichnet. Die Auszeichnung soll das Sicherheitsbewusstsein in den Werken fördern. Entscheidend für die Verbesserung der Arbeitssicherheit ist die Motivation der Mitarbeiter, die Sicherheits-Vorschriften im Betrieb richtig anzuwenden und vor allem durchzusetzen. Hierfür sind die Führungskräfte im Betrieb, die Werksleiter, Betriebsleiter und insbesondere die Meister und Vorarbeiter verantwortlich. Daher werden seit mehreren Jahren Intensiv-Schulungen für Meister und Vorarbeiter durchgeführt, die gemeinsam vom VDZ und der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft getragen werden.

Neben den Betriebsunfällen im Bereich der Instandhaltung sind diejenigen im Betriebsbereich der Klinkerproduktion die zahlreichsten und schwersten. Eine häufige Gefahrenquelle stellen z. B. Anbackungen und Verstopfungen im Zyklonvorwärmer dar.

Bei Reinigungsarbeiten und bei der Beseitigung von Störungen kann heißes Mehl plötzlich aus Stocheröffnungen austreten. Die Unfälle sind vor allem auf ein Fehlverhalten der mit der Abreinigung von Ansätzen und mit der Beseitigung von Zyklonverstopfungen beauftragten Mitarbeiter und weniger auf das Fehlen von sicherheitstechnischen Einrichtungen zurückzuführen. Die Verfahren zur routinemäßigen Beseitigung von Anbackungen im Zyklonvorwärmer, die Möglichkeiten zum Erkennen von Zyklonverstopfungen sowie die Maßnahmen zu deren sicheren Beseitigung sind in einem VDZ-Merkblatt [Me1] beschrieben. Neben der Beschreibung von Hilfs- und Sicherheitseinrichtungen werden u. a. ausführlich die Schutzkleidung als unverzichtbare Maßnahme bei der Abreinigung von Anbackungen und die besondere persönliche Schutzausrüstung (s. **Bild I.3.4-1**) wegen der besonderen Gefährdung der Mitarbeiter bei der Beseitigung von Zyklonverstopfungen dargestellt.

Das Arbeitsschutz-Gesetz aus dem Jahr 1996 verlangt, die Arbeitsbedingungen aller Arbeitsplätze hinsichtlich der *Gefährdung* der Beschäftigten zu beurteilen und das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilungen zu dokumentieren. Das gilt vor allem für Alleinarbeitsplätze. Daher wurden vom Arbeitskreis „Arbeitssicherheit" für verschiedene Anlagenbereiche eines Zementwerks Muster-Gefährdungsbeurteilungen erarbeitet. Die Mitarbeiter sind über die bei ihrer Tätigkeit auftretenden Gefahren und die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen vor Beginn der Tätigkeit und danach in angemessenen Zeitabständen zu unterweisen. Für Arbeitsplätze mit besonderer oder erhöhter Gefährdung sind Betriebsanweisungen zu erstellen, die alle für den sicheren Betrieb erforderlichen Angaben, insbesondere über die Gefahren entsprechend der Gefährdungsanalyse, die erforderlichen Arbeitssicherheits-Maßnahmen und das Verhalten bei Störungen enthalten.

Bild I.3.4-1: Frontalschutz mit aluminierter Oberfläche sowie Kopfschutzhaube mit geschlossenem Visier

Wenn voneinander unabhängige Personen oder Arbeitsgruppen gleichzeitig nahe zusammenarbeiten – z. B. während der Winterreparatur an einer Ofenanlage –, kann es trotz sicherheitsgerechten Verhaltens zu gegenseitigen Gefährdungen kommen. In diesen Fällen muss dafür gesorgt werden, dass jeweils eine zuverlässige und mit der Arbeit vertraute Person die Aufsicht führt und die Arbeiten koordiniert, damit gegenseitige Gefährdungen ausgeschlossen werden. Vor allem bei dem Bau von Großanlagen muss vom Unternehmer ein Aufsichtsführender als *Koordinator* benannt werden, der berechtigt ist, den Verantwortlichen jeder Arbeitsgruppe und jedem Beschäftigten Weisung zu erteilen.

Die Bemühungen des VDZ und seines Forschungsinstituts haben dazu beigetragen, dass die *Unfallhäufigkeit* in den deutschen Zementwerken in den letzten 30 Jahren um nahezu 1/3 abgenommen hat. Seit 1984 lag die Unfallhäufigkeit aller Mitarbeiter auf einem sehr niedrigen Niveau von rund 20 Unfällen je 1 Mio. geleisteter Arbeitsstunden. Sie lag damit in 1998 etwa 65% unter der Unfallhäufigkeit aller Mitgliedsunternehmen der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft und rund 35% unter der durchschnittlichen Unfallhäufigkeit der gesamten gewerblichen Wirtschaft. Während vor 30 Jahren durch meldepflichtige Betriebsunfälle eine mittlere relative *Ausfallzeit* von etwa 0,81% entstand, liegt dieser Wert heute nur noch bei 0,36%. Darunter versteht man die unfallbedingt ausgefallenen Arbeitsstunden, bezogen auf die Gesamtarbeitszeit der Mitarbeiter. Die wichtigsten Ergebnisse und Kennzahlen der Unfallstatistiken aus den Jahren 1996 bis 1998 sind in der **Tafel I.3.4-1** zusammengestellt. Grundlage für die Berechnung der *Unfallstatistik* bildet die Belegschaft im Betrieb. Danach hat die mittlere Unfallhäufigkeitsrate aller Werke für die Mitarbeiter im Betrieb im Jahr 1998 mit 15.06 Unfällen je 1 Mio. geleisteter Arbeitsstunden

Tafel I.3.4-1: Unfallkennzahlen für die VDZ-Mitgliedswerke in den Jahren 1969 bis 1998

Jahr	1969	1996	1997	1998
Anzahl der erfaßten Werke	98	59	59	60
Zementproduktion in Mio. t	34,3	31,5	31,2	34,0
Anzahl der Mitarbeiter im Betrieb	15190	8866	8640	8425
geleistete Arbeitsstunden	31339177	14641763	14100681	13809250
produktionsbezogener Lohnstundenaufwand in h/t	0,91	0,46	0,45	0,41
meldepflichtige Betriebsunfälle	1376	279	226	208
Unfallhäufigkeitsrate (Unfälle je 1 Mio. Arbeitsstunden)	43,90	19,06	16,03	15,06
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Betriebsunfälle	31935	8797	7127	6153
ausgefallene Arbeitstage je Arbeitnehmer	2,10	0,99	0,82	0,73
Kalenderausfalltage je Betriebsunfall	23,20	31,53	31,54	29,58
100-Mann-Quote (Unfälle je 100 Arbeitnehmer)	9,10	3,15	2,62	2,47
meldepflichtige Wegeunfälle	180	34	47	36
Kalenderausfalltage durch meldepflichtige Wegeunfälle	5822	1005	1445	1116
Unfallhäufigkeitsrate der Gesamtbelegschaft	37,70	17,02	14,10	13,23

den bisher niedrigsten Stand erreicht. Für die gewerblichen Arbeitnehmer und die Gesamtzahl der Angestellten gemeinsam ergab die Rechnung für das Jahr 1998 eine Unfallhäufigkeitsrate von 13,2.

3.4.2 Umgang mit Zement

Nach dem *Chemikaliengesetz* und der *Gefahrstoffverordnung* handelt es sich bei Zement im rechtlichen Sinne um eine „gefährliche Zubereitung". Zweck der Gefahrstoffverordnung ist es, sowohl den Menschen vor arbeitsbedingten und sonstigen Gesundheitsgefahren als auch die Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen. Dazu ist es erforderlich, potenzielle Gefahren für jeden erkennbar zu machen sowie Möglichkeiten aufzuzeigen, diese abzuwenden bzw. ihrer Entstehung vorzubeugen. Die Gefahrstoffverordnung beinhaltet somit Regelungen zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von gefährlichen Stoffen und Zubereitungen sowie zum Umgang mit ihnen.

Nach § 14 der GefStoffV hat der Hersteller oder Verkäufer gefährlicher Stoffe oder Zubereitungen, gemäß Artikel 3 der europäischen Richtlinie 91/155/EWG [Ri28] sowie Artikel 10 der europäischen Richtlinie 88/379/EWG [Ri27], den Käufern des Stoffs oder der Zubereitung ein Sicherheitsdatenblatt (SDB) zu übermitteln. Bei Zubereitungen, die im Einzelhandel für jedermann erhältlich sind (beispielsweise Sackware), ist ein SDB nicht notwendig. Es müssen dann aber alle für den Gesundheitsschutz und einen sicheren Umgang erforderlichen Maßnahmen auf der Verpackung (Kennzeichnung) ersichtlich sein.

Sicherheitsdatenblatt

Das *Sicherheitsdatenblatt* nach Gefahrstoffverordnung fasst die relevanten Angaben für den Umgang mit gefährlichen Stoffen

und Zubereitungen zusammen. Es muss folgende Angaben in nachstehender Reihenfolge enthalten:

1. Stoff-/Zubereitung- und Firmenbezeichnung
2. Zusammensetzung / Angaben zu Bestandteilen
3. Mögliche Gefahren
4. Erste-Hilfe-Maßnahmen
5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung
6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung
7. Handhabung und Lagerung
8. Expositionsbegrenzung und persönliche Schutzausrüstung
9. Physikalische und chemische Eigenschaften
10. Stabilität und Reaktivität
11. Angaben zur Toxikologie
12. Angaben zur Ökologie
13. Hinweise zur Entsorgung
14. Angaben zum Transport
15. Vorschriften
16. Sonstige Angaben

Im Sinne des Chemikaliengesetzes und der Gefahrstoffverordnung sind alle Normzemente Zubereitungen, da sie als Zubereitungsbestandteil Portlandzementklinker (bzw. gebrannten Ölschiefer) enthalten. Damit sind auch für alle Normzemente Sicherheitsdatenblätter erforderlich.

Mögliche Gefahren für den Menschen und Kennzeichnung

Zement ist als „reizend (X_i)" eingestuft. Zur Kennzeichnung sind die *Gefahrensätze* sowie die *Sicherheitsratschläge* erforderlich. **Bild I.3.4-2** zeigt die notwendige *Kennzeichnung* von Sackzement auf seiner Verpackung.

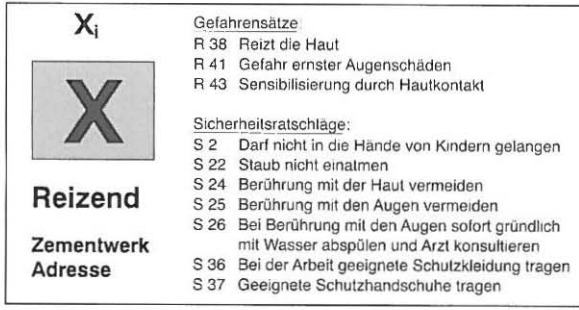


Bild I.3.4-2: Kennzeichnung von Zement „Sackaufdruck" (Originalgröße 74 mm × 105 mm)

Die Reizwirkung von Zement beruht auf der sich einstellenden Alkalität (hoher pH-Wert). Sobald trockener Zement mit Wasser vermischt wird, also bei Zementleim, Frischmörtel und Frischbeton, bilden sich Hydroxide, die teilweise in Lösung vorliegen. Einen Sonderfall stellt der Kontakt zwischen Auge und trockenem Zement dar. Hier liegt die Feuchtigkeit in Form der Augenflüssigkeit vor. Es kommt demnach auch ohne extra zugeführtes Wasser zur Reizung der Augen. Für einen sachgemäßen Umgang mit Zement ist daher eine persönliche *Schutzausrüstung* erforderlich.

Bei längerem, unsachgemäßem, d. h. ungeschütztem Kontakt kann es aufgrund der haut- und schleimhautreizenden Wirkung [Kie1] zu ernsten Hautschäden kommen. Bei langjährigem, unsachgemäßem Umgang mit Frischmörtel und -beton besteht außerdem die Möglichkeit einer Chromatsensibilisierung, die zu allergischen *Hautreaktionen* („Maurerkrätze") führen kann.

Persönliche Schutzausrüstung

Als *Handschutz* sind bei der Verarbeitung von Zement nitrilgetränkte Baumwollhandschuhe zu tragen. Wasserdurchlässige Lederhandschuhe sind nicht geeignet, da hier die Alkalität und die im Wasser gelösten, allergieauslösenden Chromate an die Haut gelangen. Als Augenschutz kommen beispielsweise Korbbrillen in Betracht. Für den Hautschutz wird ein Hautschutzplan nach den Regeln des Hauptverbands der gewerblichen Berufsgenossenschaften [BGR1] empfohlen. Beispiele für geeignete Schutzhandschuhe und Hautschutzpläne sind in **Tafel I.3.4-2** und **Tafel I.3.4-3** angegeben.

Wird in einer zementstaubhaltigen Atmosphäre gearbeitet, ist weiterhin ein *Atemschutz* (z. B. partikelfilternde Halbmaske) erforderlich. Für Portlandzementstaub gilt eine maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) von 5 mg/m^3 Luft, gemessen als einatembarer Aerosolanteil.

Erste-Hilfe-Maßnahmen

Kommt es trotz aller Schutzmaßnahmen zu einem Hautkontakt mit Zement (Frischmörtel, Frischbeton), ist die Hautpartie gründ-

Tafel I.3.4-2: Schutzhandschuhe*

Hersteller	Produktname
Kächele-Cama-Latex GmbH	SAHARA Plus
Profas GmbH	Profi
MAPA GmbH	Titanlite 397
Ansell Edmont	Hycron

* Angaben aus AMD Blickpunkt 2/98. Es handelt sich bei den aufgeführten Produkten um eine beispielhafte Auswahl.

Tafel I.3.4-3: Hautschutzplan bei Belastung durch Zement*

Hersteller	Hautschutz vor der Arbeit	Hautreinigung	Hautpflege nach der Arbeit
Faweco GmbH	Lindesa F	Lindapur	Lindesa
Feilbach Chemie	Mono-Dermin blau	Corederm S80, Luo-Dermin	Mono-Dermin
Lever Sutter GmbH	Reinol-B, Reinol Aquagard	Reinol Exclusiv, Reinol Duoclean, Reinol-LA	Reinol-P, Reinol Dermasoft
Physioderm Gmbh & Co. KG	Saniwip, Sineprint	Stephalen, Saniscrub	Phydioderm, Stephalen Creme
Stockhausen GmbH	Taktosan	Industrie praecutan, Solopol	Stokolan, Stoko Lotion

* Angaben aus AMD Blickpunkt 2/98. Es handelt sich bei den aufgeführten Produkten um eine beispielhafte Auswahl.

lich mit Wasser abzuspülen. Nach einem Augenkontakt ist das Auge sofort gründlich zu spülen und ein Arzt zu konsultieren.

Entsorgung

Nach Zutritt von Wasser ist ausgehärteter Zementstein wie Beton zu entsorgen. Bei einer zu entsorgenden Betonmenge von mehr als 5 t pro Jahr und Erzeuger besteht die vereinfachte Nachweispflicht *(Entsorgung)*.

Transport

Da Zement kein Gefahrgut darstellt, unterliegt sein *Transport* keiner besonderen Reglementierung.

Ökologische Gefahren

Zement ist in die *Wassergefährdungsklasse* WGK 1 (schwach wassergefährdend) eingestuft. Nur bei unbeabsichtigter Freiset-

zung größerer Mengen in Gewässern besteht eine ökotoxische Wirkung durch einen erhöhten pH-Wert.

Chromat

Über 300 Bauarbeiter erkranken nach Angaben der BauBG jedes Jahr in Deutschland neu an allergischer Chromatdermatitis, einer Krankheit, die im Volksmund auch *„Maurerkrätze"* genannt wird. Auslöser dieser allergischen Hautkrankheit ist *Chromat* (Chrom(VI)), das in geringen Konzentrationen im Zement und in zementhaltigen Baustoffen enthalten ist. Bei der Verarbeitung zu Frischmörtel und Frischbeton löst sich ein Teil des Chromats im Wasser. In dieser Phase besteht bei Hautkontakt die Gefahr einer sensibilisierenden Wirkung von Zement. In Abhängigkeit von der Intensität und Dauer der Kontakte sowie der Konzentration des Chromats kann es nach längerer Zeit, meistens nach 10 bis 20 Jahren, zum Ausbruch allergischer Krankheitssymptome kommen [VDZ3].

Üblicherweise sind weniger als 20 ppm wasserlösliches Chromat im Zement enthalten. Diese Menge entspricht etwa 10 bis 20% des insgesamt im Zement enthaltenen Chroms. Das Spurenelement Chrom stammt dabei aus den zur Zementherstellung verwendeten Ausgangsstoffen Kalkstein und Ton, in denen es wiederum in den der Erdkruste entsprechenden geringen Konzentrationen enthalten ist.

Nach dem heutigen Erkenntnisstand ist davon auszugehen, dass bei Konzentrationen von weniger als 2 ppm wasserlöslichen Chromats Sensibilisierungen weitgehend vermieden werden können. Zemente und zementhaltige Produkte gelten daher als chromatarm, wenn sie weniger als 2 ppm wasserlösliches Chromat enthalten. Zur Verbesserung des Arbeitsschutzes wurden 1993 die Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS 613 [TRG1] veröffentlicht, die den Einsatz chromatarmer Zemente

und zementhaltiger Zubereitungen beschreiben. Chromatarme Produkte können mit dem Aufdruck „Chromatarm gemäß TRGS 613" gekennzeichnet werden.

Im Dezember 1998 wurde gemeinsam von Vertretern der Zementindustrie, den Herstellern zementhaltiger Zubereitungen, des Baustoff-Fachhandels, des Baugewerbes, der Bauindustrie und der Bau-Berufsgenossenschaften, der Gewerkschaften sowie der Staatlichen Arbeitsschutzbehörden eine *Branchenregelung* vereinbart [VDZ4]. In ihr sind effiziente sowie technisch und wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen aufgeführt, mit denen die auftretende Maurerkrätze wirkungsvoll bekämpft werden soll. Zwei Maßnahmen sind dabei von besonderer Bedeutung:

a) Herstellung und Einsatz chromatarmer Produkte für die Bereiche der überwiegend händischen Verarbeitung: Sackzement, Werktrocken- und Werkfrischmörtel, bauchemische Produkte sowie Zweikammersilomörtel.

Bei Sackzement ist grundsätzlich und bei zementhaltigen Produkten oftmals die Zugabe eines geeigneten Reduktionsmittels erforderlich, um den Grenzwert von 2 ppm einzuhalten. Dabei wird das im Wasser gelöste Chromat in eine nicht sensibilisierende Form überführt. Chemisch bedeutet dies eine Reduzierung des sechswertigen Chroms in die dreiwertige Form. Das gebräuchlichste Reduktionsmittel ist Eisen(II)sulfat (als Hepta- oder Tetrahydrat). Für eine stabile und ausreichende Reduzierung ist eine überstöchiometrische Zugabe an Eisen(II)sulfat erforderlich. Typischerweise beträgt die Dosierung 0,2 bis 0,3% in Form des Heptahydrats, bezogen auf die Zementmenge. Die normengerechten anwendungstechnischen Eigenschaften werden durch die Reduktionsmittelzugabe nicht beeinträchtigt. Eisen(II)sulfat wird als gesundheitsschädlich mit dem Gefahrensymbol x_n eingestuft. Für den Umgang mit Eisen(II)sulfat sind die Angaben im Sicherheitsdatenblatt zu beachten. Neben

Eisen(II)sulfat gibt es noch Reduktionsmittel auf der Basis von Zinn(II)-Salzen bzw. mit Zinn(II)-Ionen modifizierten Lignosulfosäuren.

b) Vermeidung bzw. Verhinderung von direktem Hautkontakt zu feuchten zementhaltigen Baustoffen. Hierzu ist beim Umgang mit Frischmörtel und -beton das Tragen von geeigneten Schutzhandschuhen (s. Tafel I.3.4-2) erforderlich. Dabei ist es wichtig, dass die Handschuhe wasserundurchlässig sind. Geeignet sind z. B. Handschuhe aus nitrilgetränkter Baumwolle. Zusätzlich sollte die natürliche Schutzbarriere der Haut durch Hautpflege (Hautschutzplan (s. Tafel I.3.4-3)) verstärkt werden. Nicht geeignet sind hingegen die üblicherweise auf den Baustellen anzutreffenden Lederhandschuhe, die wasserdurchlässig sind und die Haut weder vor einem Kontakt mit gelöstem Chromat noch vor der reizenden Wirkung (hoher pH-Wert) schützen.

In Deutschland wird bislang zur *Chromatreduzierung* von Sackzement nahezu ausnahmslos pulverförmiges Eisen(II)sulfat verwendet. Das Eisen(II)sulfat wird vor der Packmaschine dem Zement volumetrisch oder gravimetrisch zudosiert und durch den Einfüllvorgang ausreichend homogenisiert.

4 Hydratation des Zements und Gefüge des Zementsteins

4.1 Hydratation des Zements

Aus der Reaktion zwischen Zement und Anmachwasser entstehen wasserhaltige Verbindungen, die so genannten *Hydratphasen*, die das Erstarren und Erhärten des Zementleims zum Zementstein bewirken. Bei den deutschen Normzementen ist Portlandzementklinker der wichtigste hydraulisch reagierende Hauptbestandteil. Portlandzementklinker besteht im Wesentlichen aus den im Abschnitt I.3.1.2 beschriebenen Klinkerphasen Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferriten ($C_2(A,F)$), die beim Brennen der Ausgangsstoffe entstehen. Die verschiedenen Klinkerphasen unterscheiden sich sowohl in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit als auch in ihrem Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. C_3A und C_3S hydratisieren am schnellsten, während $C_2(A,F)$ und C_2S deutlich langsamer reagieren. Für die Entwicklung der Frühfestigkeit des Portlandzements ist in erster Linie die Hydratation des C_3S verantwortlich, während C_2S zur Festigkeitsentwicklung im höheren Alter beiträgt. Zur Regelung des Erstarrungsverlaufs wird Zementen Calciumsulfat zugegeben. **Bild I.4.1-1** verdeutlicht den Beitrag der einzelnen Klinkerphasen zur Festigkeitsentwicklung.

4.1.1 Hydratphasen

Die wesentlichen wasserhaltigen Verbindungen, die bei der Hydratation aller Zemente mit Ausnahme des Tonerdezements entstehen und auf denen die Festigkeitsbildung beruht, sind die

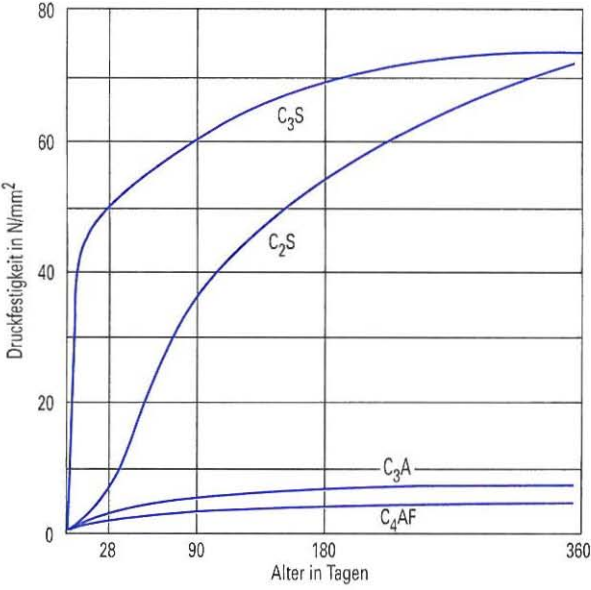


Bild I.4.1-1: Druckfestigkeiten der reinen Klinkerphasen bis zum Alter von 360 Tagen (nach R. H. Bogue und W. Lerch)

Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen). Sie entstehen aus den silicatischen Klinkerphasen C_3S und C_2S und unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung. Allgemein kann man die CSH-Phasen durch die Formel $mCaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ beschreiben, wobei m das Molverhältnis von CaO/SiO_2 (C/S-Molverhältnis) darstellt. Entscheidend für die Zusammensetzung der sich ausbildenden CSH-Phasen ist die zugegebene Wassermenge im Verhältnis zur Zementmenge, der Wasserzementwert. Üblicherweise liegt die-

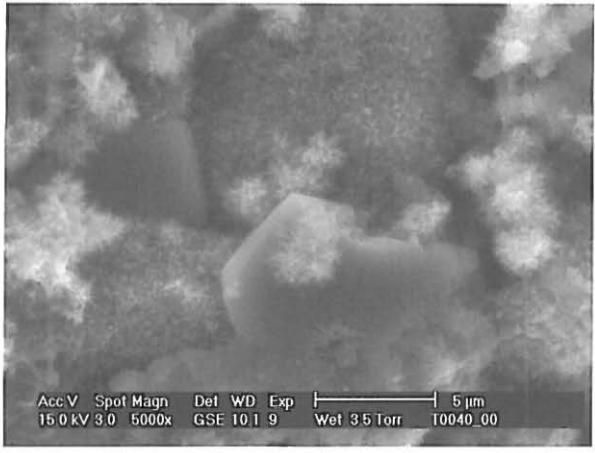


Bild I.4.1-2: ESEM-Aufnahme von CSH-Phase. Spitznadelige Primärkristallite bilden einen faserförmigen CSH-Belag auf den Zementpartikeln. Neben der mikrokristallinen CSH-Phase ist auch Calciumhydroxid in Form größerer Kristalle erkennbar. (Hydratationszeit: 24 Stunden)

ser bei der Betonherstellung zwischen 0,35 und 0,80. Dabei bilden sich Phasen mit einer sehr geringen Kristallinität, die als CSH-Phase oder CSH-Gel bezeichnet werden. Das C/S-Molverhältnis liegt zwischen 1,2 und 2,3 [Odl1]. Bei geringeren Wasserzusätzen liegt das C/S-Molverhältnis eher bei den höheren Werten, die Hydrate sind dann kalkreicher. In der Literatur werden die CSH-Phasen generell als „tobermoritähnlich" bezeichnet, da sie eine dem natürlichen Mineral Tobermorit ($5\ CaO \cdot 6\ SiO_2 \cdot 5\ H_2O$) ähnliche Kristallstruktur aufweisen.

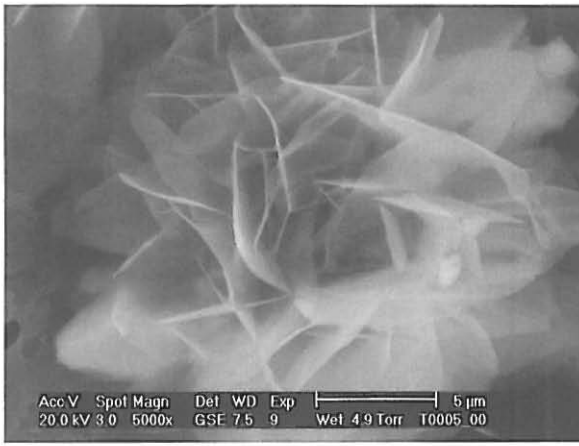


Bild I.4.1-3: ESEM-Aufnahme von dünnblättrigen Tetracalciumaluminathydratkristallen

Elektronenmikroskopische Untersuchungen [Mös1] zeigen, dass die sich bildenden CSH-Phasen die Morphologie (Form) kleiner spitznadeliger Fasern haben (**Bild I.4.1-2**). Viele dieser winzigen Primärkristalle sind zu leisten- und blättchenförmigen Strukturen zusammengelagert. Die CSH-Strukturen sind dabei mikrokristallin und röntgenamorph.

Bei der Bildung der Calciumsilicathydrate entsteht *Calciumhydroxid* (CH). Calciumhydroxid fällt kristallin in pseudohexagonaler Morphologie aus der Porenlösung aus.

Von allen Klinkerphasen weist das Tricalciumaluminat C_3A die höchste Reaktionsgeschwindigkeit auf. Die Art der sich bildenden Hydratphasen ist abhängig vom vorhandenen Sulfatangebot.

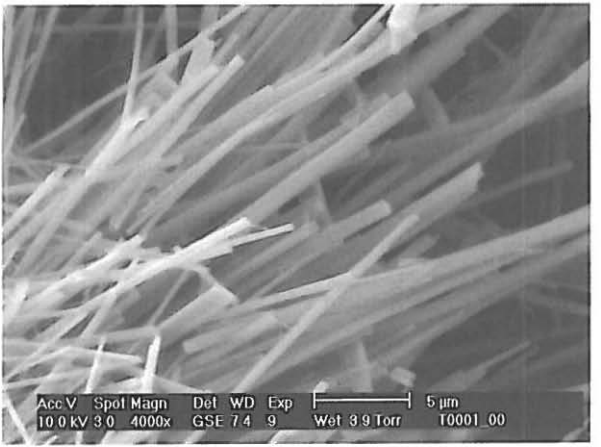


Bild I.4.1-4: ESEM-Aufnahme von prismatisch nadelförmigen Ettringitkristallen

In Abwesenheit von Sulfat bildet sich dünntafeliges hexagonales *Tetracalciumaluminathydrat* $4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19\ H_2O$ (C_4AH_{19}) (**Bild I.4.1-3**), das beim Trocknen an der Luft in die wasserärmere Verbindung C_4AH_{13} übergeht. In Anwesenheit von Sulfat bilden sich bevorzugt *Calciumaluminatsulfathydrate*. In sulfatreichen Lösungen entsteht prismatisch nadelförmiges Trisulfat $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\ CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$ (*Ettringit*) (**Bild I.4.1-4**), in sulfatärmeren und kalkreicheren Lösungen das hexagonal dünntafelige Monosulfat $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$.

Die Hydratation von Calciumaluminatferriten ($C_2(A,F)$) verläuft ähnlich. Es entstehen Verbindungen, bei denen jedoch – im Vergleich zu den Hydratationsprodukten des C_3A – ein Teil des

Al_2O_3 durch Fe_2O_3 ersetzt ist. In Gegenwart von Sulfat bilden sich *Aluminatferrit-Trisulfat* (AFt), auch Eisenettringit genannt, und *Aluminatferrit-Monosulfat* (AFm).

Unter dem Einfluss von Kohlendioxid aus der Luft kann sich Monosulfat in *Monocarbonat* $3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11\,H_2O$ umwandeln. Unter Einwirkung von Chloridlösung, beispielsweise bei Tausalz-Angriff, wandelt sich das Monosulfat zu *Monochlorid* $3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10\,H_2O$ (*Friedelsches Salz*) um, dabei wird Chlorid gebunden.

4.1.2 Hydratationsablauf

Das Gemisch aus Zement und Wasser wird als *Zementleim* bezeichnet. Zementleim besitzt anfangs eine plastische Konsistenz. Unmittelbar nach Wasserzugabe beginnen die Hydratationsreaktionen, die ein anfangs geringes, nach einiger Zeit verstärktes Ansteifen zur Folge haben. Wenn das Ansteifen eines mit Normkonsistenz hergestellten Leims ein bestimmtes, nach DIN 1164 festgelegtes Maß erreicht, tritt der Beginn des Erstarrens ein. Die zeitlich anschließende, weitere Verfestigung des Zementleims ist als *Erstarren*, die danach fortschreitende Verfestigung als *Erhärten* definiert. Der gesamte Hydratationsablauf lässt sich demnach in vier Hydratationsstadien unterteilen. Eine schematische Darstellung der Hydratphasenbildung und des Gefügeaufbaus zeigt **Bild I.4.1-5** [Loc2, Odl1].

Unmittelbar nach dem Kontakt mit Wasser setzt eine kurze, aber intensive Hydratation ein. Calciumsulfate gehen teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in Lösung. Aus der Reaktion von Calcium- und Sulfationen mit Tricalciumaluminat bilden sich auf den Oberflächen der Klinkerpartikel kurze, hexagonal säulenförmige Trisulfatkristalle. Daneben kommt es, ausgehend vom Tricalciumsilicat, zur Bildung von ersten Calciumsilicathydraten in kolloidaler Form. Durch die Bildung einer dünnen

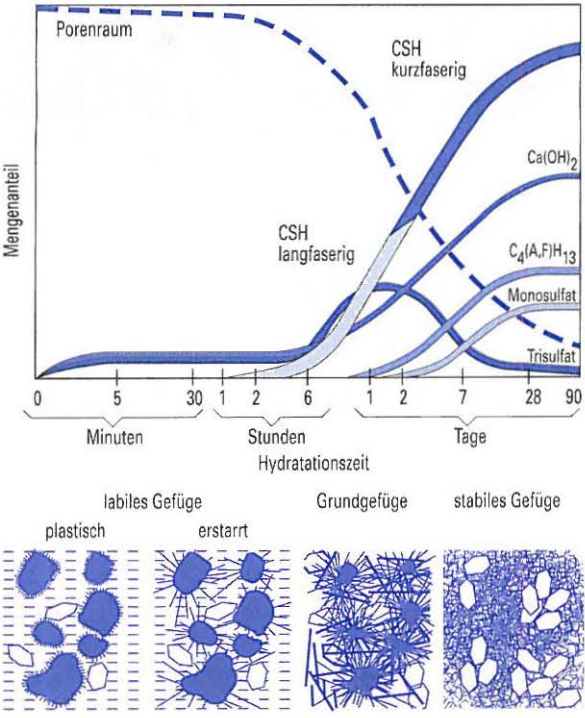


Bild I.4.1-5: Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements

Lage von Hydratationsprodukten auf den Klinkerpartikeln verebbt diese erste Hydratationsperiode, und die Ruheperiode oder Induktionsperiode beginnt. Diese ersten Hydratationsprodukte

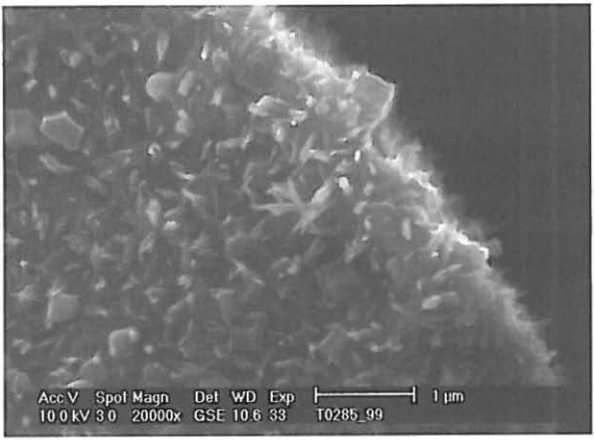


Bild I.4.1-6: ESEM-Aufnahme von Zementstein nach drei Stunden Hydratation. Sichtbar sind erste nadelige CSH-Primärkristallite und kurzstengelige prismatische Ettringitkristalle

sind noch zu klein, um den Raum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken und ein festes Gefüge aufzubauen. Damit bleiben die Zementpartikel noch gegeneinander beweglich, d. h. die Konsistenz des Zementleims ist nur wenig steifer geworden.

Während der Ruheperiode findet praktisch keine weitere Hydratation statt. Die Größe der Trisulfatkristalle bleibt zunächst nahezu unverändert. Es kommt darüber hinaus zur Bildung erster, noch sehr feiner Calciumsilicathydratkristalle, erkennbar anhand ihrer spitznadelig faserförmigen Morphologie.

Das Erstarren des Zementleims beginnt nach etwa ein bis drei Stunden innerhalb der Ruheperiode. Da während dieser Zeit

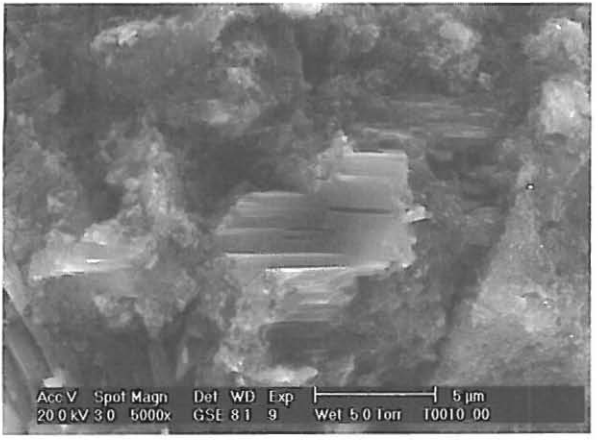


Bild I.4.1-7: ESEM-Aufnahme von Zementstein nach 28 Tagen Hydratation. Sichtbar sind das dichte CSH-Gefüge und bankige Calciumhydroxidkristalle

keine signifikante Hydratation stattfindet, wird der Konsistenzverlust auf eine Rekristallisation des bereits entstandenen Ettringits zurückgeführt. **Bild I.4.1-6** zeigt Hydratationsprodukte nach drei Stunden.

Nach Abschluss der Ruheperiode setzt erneut die Hydratation der Klinkerphasen ein. Darüber hinaus baut sich ein Grundgefüge durch Wachstum der unterschiedlichen Hydratphasen auf. Durch die größeren Kristalle werden die Zwischenräume zwischen den Zementpartikeln überbrückt. Die fortschreitende Verfestigung des Gefüges wird als Erhärten des Zements bezeichnet. Die Verfestigung nimmt weiter zu, aber mit reduzierter

Hydratationsrate. Das Gefüge verdichtet sich, die Poren werden immer stärker ausgefüllt. Außer aus Calciumsilicathydraten besteht das Zementsteingefüge aus Aluminathydraten, Aluminatsulfathydraten und Calciumhydroxid. **Bild I.4.1-7** zeigt beispielhaft das Zementsteingefüge und Hydratationsprodukte nach 28 Tagen.

Der beschriebene Hydratationsablauf gilt für Zemente mit optimal angepasstem *Sulfatträger* (Erstarrungsregler), bei dem das wasserlösliche Sulfatangebot bei Hydratationsbeginn gerade so hoch bemessen ist, dass der hydratisierende Tricalciumaluminatanteil ausschließlich als Trisulfat gebunden wird. Ohne Sulfatträger würde der frisch angemachte Zementleim sofort erstarren, da aus dem Tricalciumaluminat unmittelbar große, tafelförmige Tetracalciumaluminathydratkristalle entstehen. Diese verwachsen in dem mit Anmachwasser gefüllten Zwischenraum zwischen den Zementpartikeln zu einem kartenhausähnlichen Gefüge. Dabei bilden sich Brücken zwischen den Zementpartikeln und es kommt auf diese Weise zum *schnellen Erstarren*. Bei Sulfatmangel können sich neben Calciumaluminathydrat auch die morphologisch ähnlichen Monosulfatkristalle bilden, die ebenfalls zu einem schnellen Erstarren führen.

Bei einem Überangebot an Sulfat in der Lösung bildet sich *Sekundärgips*. Dieser besteht aus größeren tafel- oder leistenförmigen Kristallen, die große Zwischenräume überbrücken können. Das hierauf beruhende schnelle Erstarren kurz nach Wasserzugabe wird auch als *falsches Erstarren* bezeichnet. Bei längerem Mischen des Zementleims oder eines Mörtels kann diese Erscheinung „überrührt" werden. Alkalireichere Zemente neigen in Abhängigkeit vom Sulfatisierungsgrad (SG) der Alkalien zu schnellem Erstarren durch übermäßige Ettringit- (SG < 50%) bzw. durch Syngenitbildung (Syngenit = $K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$) (SG > 80%). **Bild I.4.1-8** zeigt den Einfluss

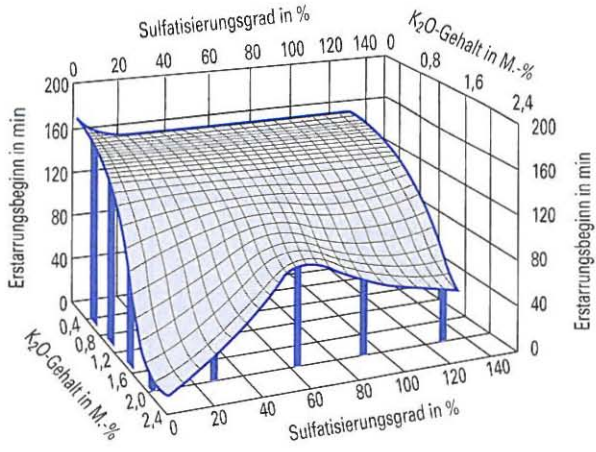


Bild I.4.1-8: Einfluss des K_2O-Gehalts und des Sulfatisierungsgrads der Alkalien im Klinker auf das Erstarren von Zementen mit optimiertem Sulfatträger (3,5 M.-% SO_3)

des K_2O-Gehalts und des Sulfatisierungsgrads der Alkalien von Modellklinkern auf das Erstarren von Zementen [Ric2].

Als optimaler Erstarrungsregler hat sich ein Gemisch aus *Gips* $CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$ und natürlichem *Anhydrit* $CaSO_4$ (Anhydrit II) erwiesen. Der Gips kann durch geeignete Prozesssteuerung beim Mahlen zu *Halbhydrat* $CaSO_4 \cdot {}^1/_2\,H_2O$ entwässern. **Bild I.4.1-9** zeigt die unterschiedlichen Wasserlöslichkeiten der Sulfatträger in Abhängigkeit von der Temperatur. Halbhydrat ist danach bei 20 °C deutlich besser löslich als Gips oder natürlicher Anhydrit.

Der zur optimalen Verzögerung des Erstarrens notwendige Gipsanteil muss umso höher sein, je größer die Reaktionsfähigkeit

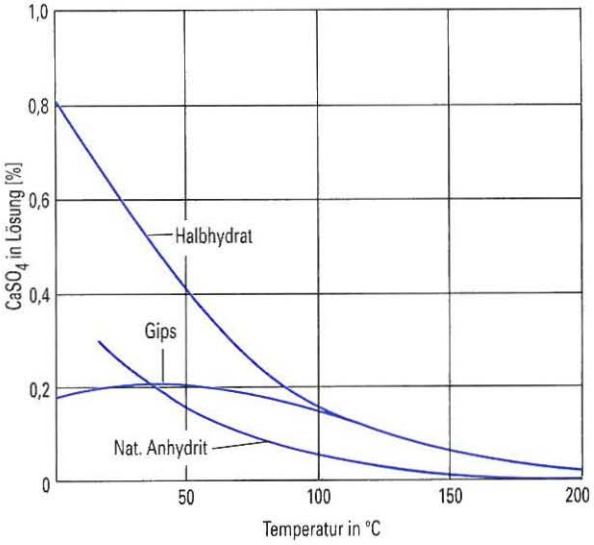


Bild I.4.1-9: Wasserlöslichkeit verschiedener Arten von Calciumsulfat (nach L. E. Copeland und D. L. Kantro)

des C_3A, je feiner der Zement gemahlen und je höher die Temperatur bei der Verarbeitung ist. Betonzusatzmittel können maßgeblich sowohl die Reaktionsfähigkeit der Aluminatphasen im Klinker als auch das Lösungsverhalten des Calciumsulfats beeinflussen und sind daher in ihren Auswirkungen zu beachten. Nach etwa 24 Stunden sollte das zur Erstarrungsregelung zugesetzte Calciumsulfat vollständig verbraucht sein, um die Anforderungen an die Raumbeständigkeit zu erfüllen. Aus diesem Grund ist der *Sulfatgehalt* der Zemente in Abhängig-

keit von Zementart und Mahlfeinheit durch die Zementnorm (DIN 1164-1, Tabelle 3) nach oben begrenzt.

Während für das Erstarren und Verarbeiten das C_3A die bestimmende Phase ist, gewinnen C_3S und später C_2S mit fortschreitender Hydratation für die Festigkeitsausbildung immer mehr an Bedeutung (Bild I.4.1-1). Die *Hydratationsgeschwindigkeit* des Zements hängt außer von den Reaktionsgeschwindigkeiten der einzelnen Klinkerphasen und ihren Anteilen (Zusammensetzung des Zements) noch von weiteren Parametern ab. Hierzu zählen die Kühlgeschwindigkeit bei der Klinkerherstellung, die Kristallitgrößen und der Verwachsungsgrad der Phasen sowie Abweichungen von der idealen Kristallstruktur (Kristalldefekte, Gitterstörungen) und die Anwesenheit von Fremdoxiden (vorzugsweise K_2O und Na_2O). Eine Erhöhung der Mahlfeinheit führt zu einer größeren Reaktivität. Darüber hinaus führen erhöhte Ausgangs- und Umgebungstemperaturen zur Beschleunigung der Hydratation (s. Abschnitte II.4.4 und II.5.2), wie auch die Art und Dauer des Mischvorgangs und die Höhe des Wasserzementwerts.

Die unterschiedlichen Hauptbestandteile des Zements tragen in unterschiedlichem Maße zum Hydratationsverlauf bei. Bei der Hydratation eines hüttensandhaltigen Zements wird der glasige Hüttensand (basische, granulierte Hochofenschlacke) durch das bei der Klinkerhydratation frei werdende Calciumhydroxid alkalisch sowie durch den Sulfatträger sulfatisch angeregt. Im Wesentlichen entstehen die gleichen Reaktionsprodukte wie bei der Hydratation von Portlandzement. Unterschiede bestehen im CaO/SiO_2-Molverhältnis der CSH-Phasen. Hüttensandreiche Hochofenzemente enthalten Calciumsilicathydrate mit C/S-Werten um 1,2 bis 1,5. Bei Portlandzement liegen die Werte über 1,5. Die latent hydraulische Reaktivität des Hüttensands hängt von dessen chemischer Zusammensetzung, dem Glas-

gehalt, der Kornfeinheit und weiteren Parametern ab. CaO und MgO in der Glasphase erhöhen die Reaktivität. Gleiches gilt für Al_2O_3. Anfänglich verläuft die Festigkeitsentwicklung von hüttensandhaltigem Zement langsamer als bei Portlandzement; nach 28 Tagen ist aber praktisch kein Unterschied mehr festzustellen.

Puzzolanisch reagierende Stoffe im Zement sind vulkanische Tuffe (z. B. Trass), Phonolithe und Steinkohlenflugaschen. Sie reagieren mit dem bei der Hydratation des Klinkeranteils frei werdenden Calciumhydroxid unter Bildung von Calciumsilicathydrat und Calciumaluminathydraten. Die puzzolanische Reaktivität der Stoffe beruht auf ihrem Glasgehalt und auf ihrem Gehalt an reaktionsfähigen Oxiden (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3). Puzzolane enthalten meist unter 5 M.-% CaO. Daher reagieren sie langsamer als Klinker oder Hüttensand, tragen folglich auch langsamer zur Festigkeitsentwicklung bei und erfordern eine deutlich längere feuchte Nachbehandlung.

Tonerdezemente unterscheiden sich in ihrer Phasenzusammensetzung grundlegend von den silicatreichen Normzementen. Wesentlicher Bestandteil ist das Monocalciumaluminat $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA), daneben in kalkreicheren Tonerdezementen das $C_{12}A_7$ und in kalkärmeren das CA_2. Der SiO_2-Anteil ist entweder als C_2S oder C_2AS (Gehlenit) gebunden, das Eisenoxid bildet wie im Portlandzementklinker Calciumaluminatferrit. Davon ausgehend hydratisiert Tonerdezement wesentlich schneller als Portlandzement, bindet dabei etwa doppelt so viel Wasser und spaltet praktisch kein $Ca(OH)_2$ ab. Bei Hydratationstemperaturen unter 25 °C entstehen aus dem CA die zwar festigkeitsbildenden, aber metastabilen Phasen Monocalciumaluminat $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10\ H_2O$ (CAH_{10}) und/oder Dicalciumaluminathydrat $2\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8\ H_2O$ (C_2AH_8). CAH_{10} und C_2AH_8 wandeln sich je nach Lagerungsbedingungen mehr oder weniger

schnell in die stabilen Phasen Hydrogranat 3 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6\ H_2O$ (C_3AH_6) und Gibbsit $Al_2O_3 \cdot 3\ H_2O$ (AH_3) um („Konversion"). Die Umwandlung ist mit einer Zunahme der Porosität und dementsprechend mit einem Festigkeitsabfall verbunden. Außerdem kommt es zu einer schnellen Carbonatisierung, und der Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls geht verloren. Bei Temperaturen von 40 °C und höher führt die Hydratation unmittelbar zur Bildung der stabilen Phasen C_3AH_6 und AH_3. Durch w/z-Werte kleiner als 0,40 lässt sich ein dichtes Zementsteingefüge erzielen. Tonerdezement ist in Deutschland nicht genormt und darf zur Herstellung von bewehrtem Beton nicht verwendet werden.

4.1.3 Hydratationswärme

Die Hydratation des Zements ist ein exothermer Prozess. Die dabei frei werdende Reaktionsenergie wird *Hydratationswärme* genannt und in der Maßeinheit J/g angegeben. Nach DIN 1164 Teil 8 wird die Hydratationswärme, die bei isothermer Lagerung freigesetzt wird, mit einem Lösungskalorimeter bestimmt. Die Hydratationswärme ist dabei die Differenz der Wärmemengen, die beim jeweiligen Auflösen einer nicht hydratisierten und einer hydratisierten Zementprobe in einem Gemisch aus Salpetersäure und Flusssäure frei werden. Abhängig von der Zusammensetzung eines Zements ergeben sich folgende typische Hydratationswärmen:

Portlandzement	375 bis 525 J/g
Hochofenzement	355 bis 440 J/g
Portlandpuzzolanzement	315 bis 420 J/g
Tonerdezement	545 bis 585 J/g
Portlandölschieferzement	360 bis 480 J/g

Bild I.4.1-10 gibt den typischen Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zemente wieder.

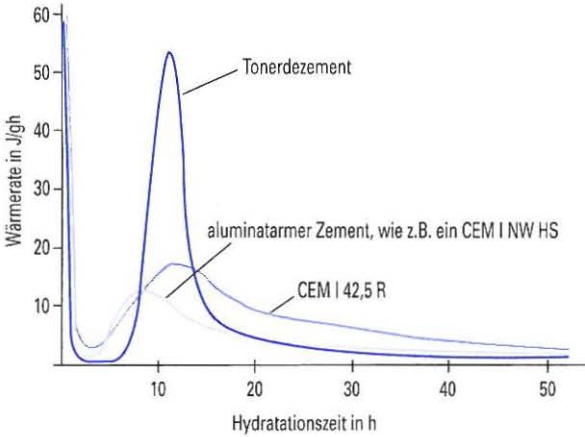


Bild I.4.1-10: Hydratationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zemente

Für die verschiedenen Klinkerphasen mit den jeweiligen Hydratationsprodukten sind folgende Reaktionsenthalpien bekannt:

$C_3S \Rightarrow$	$C_3S_2H_4$	500 J/g
$C_2S \Rightarrow$	$C_3S_2H_4$	250 J/g
$C_3A \Rightarrow$	$C_3A \cdot CS \cdot H_{12}$	1340 J/g
$C_3A \Rightarrow$	$C_3A \cdot 3\,CS \cdot H_{32}$	540 J/g
$C_3A \Rightarrow$	C_4AH_{13}	1260 J/g
$C_4AF \Rightarrow$	$C_4AH_{13} + C_4FH_{13}$	400 J/g
Freies CaO $\Rightarrow$	$Ca(OH)_2$	1150 J/g
Freies MgO $\Rightarrow$	$Mg(OH)_2$	840 J/g

Die Geschwindigkeit und der Verlauf der Wärmefreisetzung hängen somit im Wesentlichen von der Phasenzusammensetzung

des Klinkers und vom Klinkeranteil im Zement ab. Eine erhöhte Mahlfeinheit und erhöhte Umgebungstemperaturen beschleunigen die Hydratationswärmeentwicklung. Praktische Bedeutung hat die Hydratationswärme, da sie in massigen Bauteilen zu einem Anstieg der Betontemperatur führt (s. Abschnitte II.5 und II.6).

4.2 Gefüge des Zementsteins

4.2.1 Gefügeaufbau

Durch die Zugabe von Wasser zum Zement entsteht eine Suspension, die als Zementleim bezeichnet wird. Zementleim verkittet die Zuschlagkörner im Mörtel und Beton. Das Maß für das Mischungsverhältnis von Wasser und Zement ist der *Wasserzementwert* w/z, der das Gewichtsverhältnis von Wasser zu Zement angibt.

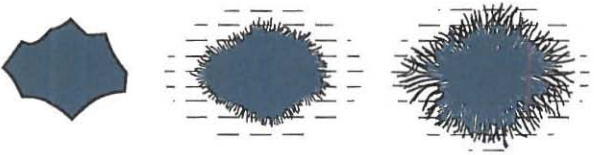
Die *Konsistenz* von Zementleim verändert sich stark mit dem w/z-Wert. Niedrige Werte unter 0,20 ergeben eine krümelige, um 0,20 eine erdfeuchte Masse. Mit einem w/z-Wert zwischen 0,20 und 0,30 entsteht eine Paste oder ein steifplastischer Brei, der technisch ebenfalls kaum zu nutzen ist, jedoch für Zementprüfungen angewendet wird (z. B. für die Raumbeständigkeitsprüfung (s. Abschnitt I.5.6, oder zur Prüfung des Erstarrens). Ein w/z-Wert zwischen 0,30 und 0,40 liefert im unteren Bereich einen zähflüssigen Zementleim, bei Werten nahe 0,40 entspricht seine Konsistenz etwa der von Motorenöl. Solcher Zementleim ist zum Herstellen von besonders festen Betonen und als Einpressmörtel zum Verpressen von Spannkanälen geeignet. Mit weiter steigendem w/z-Wert wird der Zementleim zunehmend dünnflüssiger. Bei Werten über 1,0 hat er eine wasserähnliche Konsistenz. Zur Herstellung von Mörtel und Beton werden im Allgemeinen Zementleime mit einem w/z-Wert zwischen

0,35 und 0,80 verwendet. Höhere w/z-Werte können bei weit reichenden Zementleim-Injektionen zum Dichten und Verfestigen des Baugrundes zweckmäßig sein.

Die Konsistenz des Zementleims wird überwiegend vom w/z-Wert bestimmt. Der Wasserbedarf zur Einstellung einer vorgegebenen Konsistenz (z. B. Normkonsistenz) hängt bei gegebener chemischer Reaktivität und Sulfatoptimierung des Zements in erster Linie von den physikalischen Parametern Mahlfeinheit (massenbezogene Oberfläche) und Kornverteilung ab. Die Kornverteilung wird durch die Parameter „Lageparameter x'" und „Steigungsmaß der Kornverteilung n" aus dem RRSB-Körnungsnetz gekennzeichnet. Kornform und Oberflächenrauigkeit, wie auch die Reaktivität der Zementpartikel spielen eine untergeordnete Rolle [Sch5].

Wegen seiner im Vergleich zu Wasser etwa dreimal größeren Dichte neigt der Zement im Zementleim zum Sedimentieren. Dadurch kann sich an der Oberfläche des Zementleims eine mehr oder weniger dicke Wasserschicht ansammeln. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Wasser absondern" oder „Bluten". Die Neigung zum Wasser absondern nimmt mit dem w/z-Wert stark zu. Sie ist bei grob gemahlenen Zementen stärker ausgeprägt als bei fein gemahlenen, weil durch größere Oberflächen auch größere Wassermengen als benetzender Film gebunden werden. Im Beton ist das Wasser absondern nicht so stark ausgeprägt wie in reinem Zementleim, weil die feinen Zuschlagkörner ebenfalls einen Teil des Zugabewassers zum Benetzen benötigen.

Bei Normkonsistenz sind im Zementleim die einzelnen Zementpartikel von Wasserhüllen umgeben und dadurch gegeneinander verschiebbar. Durch die bei der Hydratation entstehenden *Hydratationsprodukte* werden sie zunehmend starr miteinander verbunden. Durch diesen Vorgang verfestigt sich der Zement-



a) Zementkorn vor Wasserzugabe

b) Zementkorn kurz nach Wasserzugabe

c) Ende der Hydratation

Bild I.4.2-1: Schematisch vereinfachte Darstellung der Hydratation eines Zementkorns

leim zu *Zementstein*. Der Aufbau und die Eigenschaften des Zementsteins gehen aus der nachfolgenden, schematisch vereinfachten Darstellung der Hydratation eines einzelnen Zementkorns hervor.

Im **Bild I.4.2-1** ist links ein Zementkorn vor der Wasserzugabe dargestellt; sein Durchmesser liegt in der Größenordnung von einigen bis hundert µm. Nach der Wasserzugabe beginnen die Hydratationsreaktionen, die in Abschnitt I.4.1 im Einzelnen beschrieben sind. Dabei bilden sich als Hydratationsprodukte vorwiegend faserförmige *Calciumsilicathydrate*, *Calciumhydroxid* sowie in geringerer Menge Ettringit und Monosulfat. Diese Hydratationsprodukte werden auch als Zementgel bezeichnet, weil sie aus submikroskopisch kleinen Partikeln bestehen. Ihre mittlere Kristallgröße beträgt nur etwa ein Tausendstel der mittleren Zementkorngröße und liegt damit im Bereich weniger Nanometer.

Das *Zementgel* umgibt das Zementkorn zunächst nur in einer dünnen Schicht, wie in Bild I.4.2-1 in der Mitte dargestellt. Zur weiteren Hydratation diffundiert das Wasser zunächst durch die

äußere Gelschicht bis an den noch nicht hydratisierten Kern des Zementkorns. Dort löst es einen weiteren Teil des Zementkorns. In dem dabei frei werdenden inneren Raum fällt ein Teil der gelösten Stoffe sofort als Zementgel aus. Die restlichen gelösten Stoffe diffundieren durch die bereits vorhandene Gelschicht nach außen und fallen dort an der Grenze Gelschicht/Wasser aus. Die Hydratationsprodukte wachsen also in den Wasserraum, der das einzelne Zementkorn allseitig umgibt, hinein. Nach vollständiger Hydratation, die je nach Größe des Zementkorns Tage bis Monate dauert, nimmt das Gel einen etwas mehr als doppelt so großen Raum ein wie das ursprüngliche Zementkorn (Bild I.4.2-1 rechts).

Bezogen auf das Volumen des nicht hydratisierten Zements und des bei vollständiger Hydratation chemisch gebundenen Wasseranteils (s. Abschnitt 4.2.2) ist das Volumen der Hydratationsprodukte um ca. 6 cm^3/100 g Zement kleiner, weil das in den Hydratationsprodukten gebundene Wasser weniger Raum einnimmt als flüssiges Wasser. Die äußeren Abmessungen des Zementsteins ändern sich dann nicht, wenn durch Wasserzufuhr von außen, z. B. bei unter Wasser gelagertem Zementstein, ausreichend Wasser nachgeführt wird. Bei Zementstein mit niedrigen w/z-Werten ($w/z \leq 0{,}40$) und mangelnder Wasserzufuhr von außen führt die chemische Bindung von Wasser in den Kristallen der Hydratationsprodukte zu einer Volumenminderung, die als „chemisches *Schwinden*" oder „Schrumpfen" bezeichnet wird (s. Abschnitt II.6).

Maßgebend für den Gefügeaufbau und auch die Eigenschaften des Zementsteins ist vor allem der w/z-Wert, durch den bei gleicher Feinheit und Kornzusammensetzung des Zements die durchschnittliche Dicke der Wasserschicht zwischen zwei benachbarten Zementkörnern bestimmt wird. Sie liegt in der Größenordnung von wenigen µm und nimmt mit dem

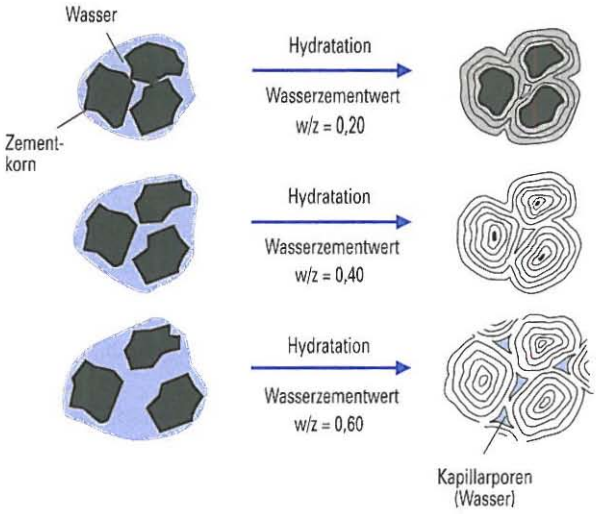


Bild I.4.2-2: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei verschiedenen w/z-Werten

w/z-Wert etwas weniger als proportional zu, d. h. sie wird beispielsweise etwa 1,7 mal so groß, wenn sich der w/z-Wert von 0,40 auf 0,80 verdoppelt. Schematisch ist dies in der linken Hälfte in **Bild I.4.2-2** für die w/z-Werte 0,20, 0,40 und 0,60 dargestellt.

Bei der Hydratation des Zements dringen die Hydratationsprodukte in die wassergefüllten Zwischenräume vor (Bild I.4.2-1). Trocknet der Zementstein nicht vorzeitig aus, so kommt dieser Vorgang erst zum Stillstand, wenn die wassergefüllten Zwischenräume ganz ausgefüllt sind oder wenn der gesamte Zement

hydratisiert ist. Da das Zementgel einschließlich der Gelporen einen etwas mehr als doppelt so großen Raum einnimmt als der ursprüngliche Zement, wäre z. B. bei einem niedrigen w/z-Wert von 0,20 der sehr kleine Zwischenraum vollständig mit Zementgel ausgefüllt, bevor der Zement vollständig hydratisiert ist. Dann bleiben im Zementstein noch unhydratisierte Reste in der Mitte der ursprünglichen Zementkörner zurück. Andererseits verbleiben bei einem w/z-Wert von 0,60 auch nach vollständiger Hydratation noch Teile des ursprünglich mit Wasser gefüllten Zwischenraums in Form von Kapillarporen. Bei einem w/z-Wert von etwa 0,40 reicht bei einer vollständigen Hydratation die Menge des Gels gerade aus, um den Platz der ursprünglichen Zementkörner sowie des ursprünglich mit Wasser gefüllten Zwischenraums vollständig zu füllen.

Die obigen Ausführungen gelten nur im statistischen Mittel, d. h. es kann bei einem w/z-Wert etwas unterhalb 0,40 durchaus sein, dass auch nach langjähriger Feuchtlagerung an einer Stelle des Zementsteins noch unhydratisierte Teile eines ursprünglich sehr großen Zementkorns vorliegen, während an anderer Stelle ein Hohlraum verblieben ist. Bei gleichem w/z-Wert ist der Aufbau bei fein gemahlenen Zementen etwas gleichförmiger als bei grob gemahlenen, weil das Volumen der wassergefüllten Zwischenräume im Zementleim zwar gleich groß ist, sich jedoch auf mehr Zwischenräume mit demzufolge kleinerem mittleren Abstand von zwei benachbarten Körnern verteilt.

4.2.2 Wasserbindung

Aus den Erläuterungen zum Aufbau des Feststoffgefüges im Zementstein im vorangegangenen Abschnitt ergibt sich, dass Wasser im Zementstein in sehr unterschiedlichen Bindungszuständen vorhanden ist. Ein großer Teil des Wassers wird im Laufe der Hydratation chemisch in den Hydratphasen einge-

bunden. Das chemisch gebundene Wasser wird auch als *Kristallwasser* bezeichnet. Eine Entfernung dieses Kristallwassers, z. B. durch hohe Temperaturen, bedeutet die Zerstörung der Hydratationsprodukte. Die Temperaturen, bei denen dies stattfindet, sind bei jeder Hydratphase unterschiedlich.

Die Hydratationsprodukte, die das Zementgel bilden, können auch bei dichtester Packung den Raum nicht vollständig ausfüllen. Die verbleibenden Zwischenräume, die ca. 25 bis 30% des Gelvolumens einnehmen, werden als *Gelporen* bezeichnet. Die Gelporosität ist weitgehend unabhängig vom w/z-Wert. Der mittlere Durchmesser der Gelporen entspricht etwa der Größe der Gelpartikel (wenige nm). Gelporen sind immer physikalisch mit Wasser gefüllt. In Abschnitt I.4.2.1 wurde erläutert, dass ein w/z-Wert von 0,40 gerade für eine vollständige Hydratation von Portlandzement ausreicht. Von diesen 40 M.-% Wasser (bezogen auf den Zementgehalt) sind also nach Ablauf der Hydratation ca. 25 M.-% chemisch in den Hydratationsprodukten gebunden, die Gelporen enthalten ca. 15 M.-% des Wasseranteils. Ohne diesen Anteil an Gelporenwasser ist eine vollständige Hydratation nicht möglich.

Im Zementstein verbleiben je nach w/z-Wert unterschiedlich große Porenanteile, die durch das nicht für die Hydratation gebrauchte (d. h. gebundene oder in den Gelporen eingelagerte) „Überschusswasser" eingenommen werden (s. Bild I.4.2-2). Diese so genannten Kapillarporen sind im Durchschnitt 1000-mal so groß wie die Gelporen. Wie **Bild I.4.2-3** zeigt, hängt der Anteil an Kapillarporen direkt vom w/z-Wert ab. Oberhalb eines w/z-Werts von ca. 0,40 sind Kapillarporen ein unvermeidbarer Bestandteil des Zementsteingefüges. Ihr Anteil wächst sehr stark mit zunehmendem w/z-Wert. Die Kapillarporen sind die Ursache dafür, dass sich ein ansteigender w/z-Wert festigkeitsmindernd auswirkt. Der Wassergehalt in

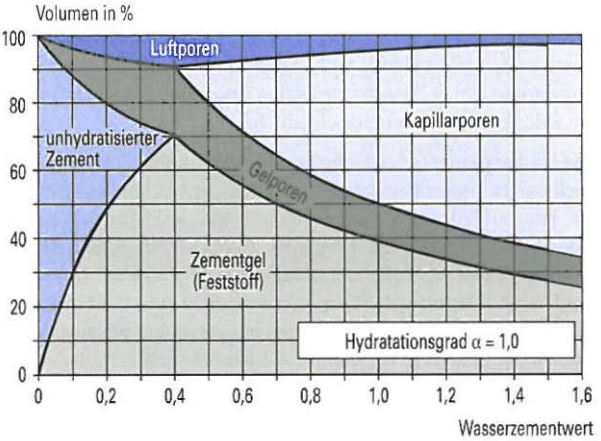


Bild I.4.2-3: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom w/z-Wert

den Kapillarporen steht in direkter Abhängigkeit zu den Umgebungsbedingungen, insbesondere der relativen Luftfeuchte. Ein Teil dieses Wassers wird bei abnehmender Umgebungsfeuchte desorbiert, bei zunehmender Umgebungsfeuchte adsorbiert. Dieser reversible Prozess, der mit einer Volumenänderung verbunden ist, führt zum unvermeidbaren Schwinden und Quellen zementgebundener Baustoffe (s. Abschnitt II.6). Eine über die natürlichen Austrocknungsprozesse hinausgehende, vollständige Entfernung des im Zementgel enthaltenen Wassers – z. B. erzwungen durch extremen Temperatureinfluss – geht mit einer irreversiblen Schädigung des Zementsteingefüges einher. Noch bedeutender ist die Kapillarporosität für alle Dauerhaftigkeitsaspekte, da über die *Kapillarporen* Lösun-

gen und Gase eindringen können, die den Beton schädigen (Abschnitt II.7).

Bei der Bestimmung des Wassergehalts von Zementstein ist eine zuverlässige Trennung zwischen dem chemisch gebundenen Wasser, dem Gelwasser und dem Kapillarwasser nicht möglich. Ein Teil des Gelwassers befindet sich in so feinen Poren, dass zu seiner Austreibung Temperaturen erforderlich sind, bei denen sich bereits Hydratwasser aus verschiedenen Hydratationsprodukten entfernen lässt. Ebenso überlappt der Größenbereich der großen Gelporen mit dem der kleinen Kapillarporen – somit ist eine scharfe Trennung auch hier unmöglich.

Daher wird nach einer, seit den Untersuchungen von T. C. Powers gebräuchlichen Konvention, zwischen dem „verdampfbaren" und dem „nicht verdampfbaren" Wasser des Zementsteins unterschieden. Bei dem verdampfbaren Wasser, also dem Wasser, das sich z. B. durch Trocknung im Vakuum oder im Trockenschrank bei 105 °C austreiben lässt, handelt es sich um Kapillar- und Gelwasser. Im Gegensatz zum gebundenen Wasser spricht man hier vom „freien" Wasser. Das nicht verdampfbare Wasser, das durch Glühen bei rd. 1000 °C bestimmt werden kann, ist chemisch gebunden. Sein Anteil beträgt bei vollständig hydratisiertem Portlandzement etwa 25 M.-%, bezogen auf die Masse des ursprünglichen Zements. Dieser Wert ändert sich nur wenig mit der Zementzusammensetzung.

Die Grenzen zwischen den verschiedenen Wasserbindungsarten sind zu unscharf, sodass eine klare Trennung durch diese Messverfahren bis heute nicht möglich ist. So gehört einerseits ein Teil des „freien" Wassers bereits zum Feststoff, z. B. als geordnetes Zwischenschichtwasser im schichtförmig aufgebauten Calciumsilicathydrat. Andererseits lässt sich das Wasser aus extrem feinen Gelporen nicht durch Verdampfen austreiben.

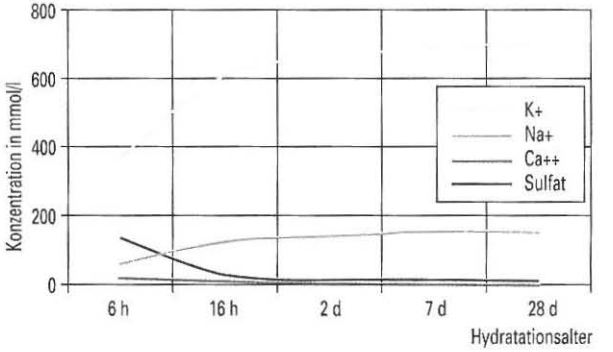


Bild I.4.2-4: Zusammensetzung der Porenlösung in Portlandzementstein (w/z = 0,50) in Abhängigkeit von der Zeit

4.2.3 Porenlösung

Die Poren des Zementsteins sind zum Teil mit Wasser gefüllt. Die Zusammensetzung dieser so genannten *Porenlösung* steht stets in engem dynamischen Gleichgewicht mit den reagierenden Zementphasen und den neugebildeten Hydratphasen. Sie verändert sich daher im Verlauf der Hydratation, insbesondere in den ersten Stunden und Tagen, sehr stark (s. **Bild I.4.2-4**) [Gun1, Loc3, Tay1].

Die Zusammensetzung der Porenlösung hat maßgeblichen Einfluss auf alle Reaktionen, die während der Zementhydratation ablaufen und besonders auf die Dauerhaftigkeit.

Für den Ablauf des Erstarrungsprozesses ist der Sulfatgehalt der Lösung entscheidend, in der die Zementpartikel suspendiert („Zementleim") sind. Daher wird das Sulfatangebot gezielt mit Hilfe des zugegebenen Sulfatträgers gesteuert (s. Abschnitt I.4.1).

Dabei ist nicht allein der Gehalt an Sulfatträgern entscheidend, sondern insbesondere auch die Art [Loc4, Lud1]. So sind z. B. Halbhydrat und löslicher Anhydrit III viel leichter löslich als Gips oder natürlicher Anhydrit II. Eine zunehmende Lösungsgeschwindigkeit des Sulfatträgers ist bei gleichem Sulfatgehalt gleichbedeutend mit einem höheren Sulfatangebot in der Porenlösung. Das Sulfat des Klinkers liegt in Form leicht löslicher Alkalisulfate vor [Loc5].

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Porenlösung sind gelöste Alkalien. Dieser ist nicht allein vom Alkaligehalt des Zements abhängig, sondern wird in starkem Maße davon beeinflusst, in welcher Form die Alkalien im Klinker bzw. in weiteren Hauptbestandteilen vorliegen. So sind Alkalisulfate sehr leicht löslich, während in den Klinkerphasen eingebundene Alkalien erst mit fortschreitender Hydratation in Lösung gehen. Daher stellt der Sulfatisierungsgrad ein wichtiges Bewertungsmerkmal für die Verfügbarkeit der Alkalien des Klinkers dar.

Für den Alkalihaushalt der Porenlösung sind jedoch nicht allein die Lösungsabläufe der Alkalien aus den Ausgangsstoffen, sondern auch die in Abhängigkeit von der Zementzusammensetzung unterschiedlichen Bindungen der Alkalien in den Hydratationsprodukten maßgebend. So ist z. B. eine im Vergleich zum Portlandzementklinker vermehrte Einbindung von Alkalien in die Reaktionsprodukte von Hüttensanden und Puzzolanen zu verzeichnen. Dabei ist nicht eindeutig geklärt, inwiefern es sich um eine chemische Bindung in den Hydratphasen oder um eine adsorptive Bindung an der Oberfläche der Hydratphasen handelt [Men1].

Alkalien können die Reaktivität verschiedener Zementbestandteile (z. B. Hüttensand, Puzzolane) erhöhen. Im Beton kann sich ein hoher Alkaligehalt der Porenlösung vorteilhaft oder nachteilig auf die Dauerhaftigkeit auswirken. So ist die Alkali-

Ionen-Konzentration für die Aufrechterhaltung eines für den Korrosionsschutz der Bewehrung wichtigen hohen pH-Werts entscheidend. Gleichzeitig fördert ein hoher Alkaligehalt aber auch bei alkaliempfindlichen Zuschlägen die Neigung zur schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (s. Abschnitt II.7.6), bei der die im Porenwasser gelösten Alkalien mit den kieselsäurehaltigen Bestandteilen der Zuschläge unter Bildung eines quellenden Alkali-Silica-Gels reagieren.

5 Bautechnische Eigenschaften des Zements

Für den Anwender sind in erster Linie die bautechnischen Eigenschaften des Zements von Bedeutung, die stoffliche Zusammensetzung und Zementart hingegen nur insoweit, wie sie hierauf einen größeren Einfluss ausüben. Für die Beurteilung der wichtigsten Eigenschaften, wie z. B. die *Festigkeit*, das *Erstarren* oder die *Raumbeständigkeit*, legt die Zementnorm Prüfverfahren und zugehörige Grenzwerte fest (DIN 1164-1, Oktober 1994, prEN 197-1).

Zement ist ein Massenbaustoff der Steine- und Erden-Industrie. Er wird hergestellt aus den in der Natur vorliegenden Rohstoffen, u. U. mit zusätzlicher Verwendung geeigneter Nebenprodukte anderer Industrien. Eigenheiten des jeweiligen Rohstoffvorkommens oder der Nebenprodukte beeinflussen dabei sowohl die Herstellung als auch die bautechnischen Eigenschaften des Zements. Zwar können fehlende Komponenten dem Ausgangsstoff zugesetzt werden, es ist jedoch im Allgemeinen sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, unerwünschte Bestandteile, die nur in geringen Mengen und fein verteilt vorhanden sind, den Roh- und Ausgangsstoffen vor der Verarbeitung zu entziehen.

Mit Hilfe der heutigen ausgereiften Zementtechnik können die wichtigen bautechnischen Eigenschaften des Zements – wie z. B. Festigkeit, Erstarren und Raumbeständigkeit – zielsicher und zuverlässig eingestellt werden. Daneben gibt es andere bautechnische Eigenschaften, die sich nur graduell beeinflussen lassen. Dazu zählt z. B. die Festigkeitsentwicklung bei vorge-

gebener 28-Tage-Druckfestigkeit. Zemente gleicher Art und Festigkeitsklasse können sich in ihren Eigenschaften wegen der standortbezogenen Gegebenheiten (Rohstoffvorkommen, Herstellverfahren) unterscheiden. Bautechnisch sind diese Nuancen in den Zementeigenschaften im Allgemeinen nicht relevant. In der Praxis werden solche Unterschiede durch Erstprüfung bei der Beton- bzw. Mörtelherstellung erfasst. Zur Erfüllung von Anforderungen an die Baustoffqualität ist außer der Einstellung von Stoffeigenschaften auch ein sachgerechter Umgang mit den Baustoffen erforderlich.

Die Zementnorm DIN 1164-1 unterscheidet zwölf *Zementarten*, deren Zusammensetzung aus Tafel I.2.1-1 hervorgeht (s. auch Abschnitt I.2). Diese Norm wird bei Zustimmung der CEN-Mitgliedsländer durch die europäische Norm EN 197-1 ersetzt, die 27 Zementarten unterscheidet.

Im Vergleich zu Portlandzementklinker beteiligen sich Hüttensand, Flugasche und Puzzolane im Allgemeinen langsamer an den Hydratationsreaktionen und damit an der Festigkeitsentwicklung. Folglich wird die bei der Erhärtung entstehende Hydratationswärme ebenfalls langsamer freigesetzt. Bautechnisch kann sowohl eine schnelle Erhärtung als auch eine langsame Entwicklung der Hydratationswärme vorteilhaft sein.

Die Zementnorm räumt die Möglichkeit ein, dem Zement bei der Herstellung bis zu 5 M.-% an speziell ausgewählten anorganischen, mineralischen *Nebenbestandteilen* zuzusetzen. Als solche Nebenbestandteile dürfen *Hüttensand*, *Puzzolane*, *Flugasche*, *gebrannter Schiefer* und/oder aus dem Werkbetrieb stammende, ungebrannte oder teilweise gebrannte Grundstoffe der Klinkerproduktion, z. B. *Rohmehl*, verwendet werden. Durch ihren Einsatz lassen sich einige physikalische Eigenschaften des Zements verbessern. Dazu zählen insbesondere die Vergleichmäßigung der rheologischen Eigenschaften von Zement-

leimen aus Zementen, die zur Einhaltung einer gleich bleibenden 28-Tage-Druckfestigkeit unterschiedlich fein gemahlen werden müssen sowie eine Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens von Zement im Beton.

5.1 Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung

Die wichtigsten Eigenschaften des Zements – Wasseranspruch, Erstarren und die Festigkeitsentwicklung – werden bei gegebener chemischer und mineralogischer Zusammensetzung der Hauptbestandteile und optimaler Abstimmung des eingesetzten Sulfatträgers maßgebend von der *Mahlfeinheit* und der *Korngrößenverteilung* der Hauptbestandteile des Zements beeinflusst. Die Mahlfeinheit kann gemäß DIN 1164 durch die massebezogene *Oberfläche nach Blaine* anhand von Luftdurchlässigkeitsmessungen in cm^2/g beschrieben werden. Die Messung ist einfach und schnell durchzuführen und wird deshalb vor allem zur Überwachung des Mahlbetriebs eingesetzt.

Zemente mit einer Mahlfeinheit unter 2800 cm^2/g gelten als grob, solche mit mehr als 4000 cm^2/g als fein. Als mittlere Mahlfeinheit kann ein Bereich von etwa 2800 bis 4000 cm^2/g angesehen werden. Sehr feine Zemente haben eine Mahlfeinheit zwischen 5000 und 7000 cm^2/g.

Die massebezogene Oberfläche ist aber kein eindeutiges Feinheitsmerkmal. So können Mahlgüter auch bei gleicher massebezogener Oberfläche eine deutlich unterschiedliche Kornverteilung haben. Über die Kornverteilung lassen sich die Produkteigenschaften gezielt beeinflussen.

Im Feinheitsbereich über 125 µm wird die Partikelgrößenverteilung pulverförmiger Stoffe meist durch *Siebanalyse* ermittelt. Für die Analyse des Feinbereichs unterhalb 125 µm wird

derzeit fast ausschließlich das automatisch arbeitende *Laser-Granulometer* verwendet. Für die Beschreibung von Partikelgrößenverteilungen hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Massenverteilung in den einzelnen Korngrößenklassen als *Massenverteilungssumme* in M.-% in Abhängigkeit von der Korngröße in µm darzustellen. In einem ausgewählten *Körnungsnetz* nach DIN 66145 (RRSB-Körnungsnetz) ergibt die Massensummenverteilung von Zementen einen nahezu linearen Verlauf. Diese Gerade kann durch zwei Parameter, den *Lageparameter* x' und das *Steigungsmaß* n, eindeutig gekennzeichnet werden. Der Lageparameter x' bezeichnet z. B. die Korngröße bei einer Massenverteilungssumme von 63,2 M.-%, die ein Maß für den *Feinkornanteil* ist. Der Lageparameter von Zementen liegt meist zwischen etwa 10 und 40 µm und ist umso kleiner, je feiner der Zement ausgemahlen wurde. Das Steigungsmaß n ist der Anstieg der *Verteilungsausgleichsgraden* im Körnungsnetz und damit ein Maß für die Breite der Verteilung. Es liegt meist zwischen etwa 0,8 und 1,1 und ist umso größer, je enger die

Tafel I.5.1-1: Parameter der Korngrößenverteilungen und massebezogene Oberfläche von Portlandzementen

Zementsorte				CEM I 32,5	CEM I 42,5	CEM I 52,5
Lageparameter der	H			31,3	21,0	13,0
Kornverteilung im	M	x'	µm	24,8	16,0	10,8
RRSB-Netz	N			19,6	11,3	8,6
Steigungsmaß der	H			0,99	1,11	1,14
Kornverteilung im	M	n	–	0,90	0,99	1,02
RRSB-Netz	N			0,80	0,84	0,92
massebezogene	H			3850	4730	6400
Oberfläche	M	0_m	cm^2/g	3040	3920	5290
nach Blaine	N			2540	3200	4570

Stand: 1985 (H = Höchstwert, M = Mittelwert, N = Niedrigstwert)

Verteilung ist. **Tafel I.5.1-1** enthält die Mittelwerte von Messungen der Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung an einer größeren Zahl der in der Bundesrepublik Deutschland hergestellten Portlandzemente.

Danach haben zum Beispiel Portlandzemente der Festigkeitsklasse 32,5 im Mittel eine massebezogene Oberfläche von ~ 3000 cm^2/g und einen Lageparameter x′ von ~ 25 µm, d. h. etwa $^2/_3$ der Zementpartikel sind kleiner als 25 µm. Das mittlere Steigungsmaß n beträgt 0,90. Die Korngrößenverteilung ist also verhältnismäßig breit. Die Parameter der Korngrößenverteilungen wurden aufgrund der Ergebnisse von Messungen mit dem Laser-Granulometer errechnet. Im **Bild I.5.1-1** sind die Schwankungsbereiche der Korngrößenverteilungen am Beispiel verschiedener Portlandzemente dargestellt.

Bei gegebener Zusammensetzung des Klinkers und Optimierung des Sulfatträgergemisches werden die Verarbeitbarkeit und die Festigkeitsentwicklung des Zements maßgeblich von der Partikelgrößenverteilung beeinflusst [Kuh2, Spr3]. Aus der betrieblichen Praxis ist bekannt, dass die Normdruckfestigkeit von Portlandzement unter bestimmten Voraussetzungen mit zunehmender massebezogener Oberfläche ansteigt. Darüber hinaus weisen Zemente mit gleicher massebezogener Oberfläche und engerer Partikelgrößenverteilung eine deutlich größere Normdruckfestigkeit auf als Zemente mit breiter Partikelgrößenverteilung. Schließlich ändert sich die 28-Tage-Normfestigkeit nicht, wenn der Lageparameter x′ konstant bleibt.

Bei Zementen mit *mehreren Hauptbestandteilen*, z. B. Hüttenzementen und Portlandkalksteinzementen, können sich neben den Mahlfeinheiten und Partikelgrößenverteilungen insbesondere die Anteile und Reaktionsfähigkeiten aller Zementkomponenten in starkem Maß auf die Normdruckfestigkeit auswirken [Ell3, Mül1].

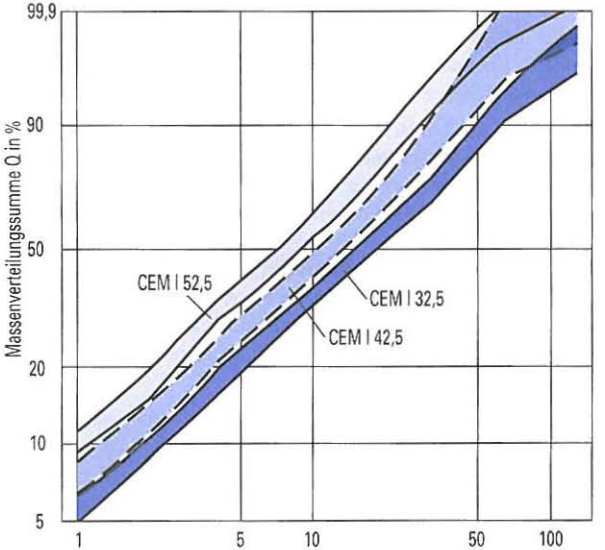


Bild I.5.1-1: Schwankungsbreite der Korngrößenverteilungen verschiedener Zementsorten

5.2 Ansteifen und Erstarren

Durch Mischen von Zement und Wasser entsteht der *Zementleim*, der im Beton die einzelnen Körner des Zuschlaggemischs umhüllt und durch sein *Erhärten* fest miteinander verbindet. Dabei geht der nach der Wasserzugabe flüssige Zementleim in den festen *Zementstein* über. Diese Zustandsänderung von flüssig nach fest ist erwünscht und eine kennzeichnende Eigenschaft des Zements. Sie geschieht nicht schlagartig, vielmehr wird der

zunächst dünnflüssige Leim nach einer gewissen Zeit dickflüssiger und steifer, erstarrt dann und wird schließlich fest. *Ansteifen*, Erstarren und Erhärten des Zementleims und Betons treten in dieser Reihenfolge bei jeder Betonherstellung in einem technologisch beeinflussbaren zeitlichen Ablauf auf.

Der zeitliche Ablauf des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens lässt sich beschreiben, indem die rheologischen Veränderungen des Zementleims oder Betons – seine *„Viskosität"* – mit der Zeit registriert oder über der Zeit aufgetragen werden. Da die Ausgangsviskosität das Ergebnis stark beeinflussen kann, wird für vergleichende Untersuchungen zweckmäßig eine bestimmte, definierte Ausgangsviskosität V_O eingestellt.

Bild I.5.2-1 gibt schematisch die Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement wieder, wie sie der Prüfung des Erstarrens nach DIN EN 196-3 zugrunde liegt. Zunächst wird dabei aus Zement und Wasser ein steifer Zementleim mit einer definierten Ausgangsviskosität V_O (*„Normsteife"*) hergestellt. Es wird also kein festgelegter Wasserzementwert bei dieser Prüfung verwendet, vielmehr muss die für die Normsteife erforderliche Wassermenge durch Vorversuche ermittelt werden. Er liegt im Regelfall zwischen 23 und 30 M.-%. Dabei haben sehr feine Zemente meistens einen höheren *Wasseranspruch* als Zemente mit grober und mittlerer Mahlfeinheit. Geprüft wird sowohl die Normsteife V_O als auch die als Erstarrungsbeginn festgelegte Viskosität V_A und die als Erstarrungsende festgelegte Viskosität V_E mit dem Nadelgerät nach L. J. Vicat.

Die Zeit von der Wasserzugabe bis zum Erreichen der Viskosität V_A wird als *Erstarrungsbeginn* und die Zeit von der Wasserzugabe bis zum Erreichen der Viskosität V_E als *Erstarrungsende* bezeichnet. Die Viskositätsänderung von V_O bis V_A, die zeitlich vor dem Erstarrungsbeginn liegt, wird als Ansteifen und die

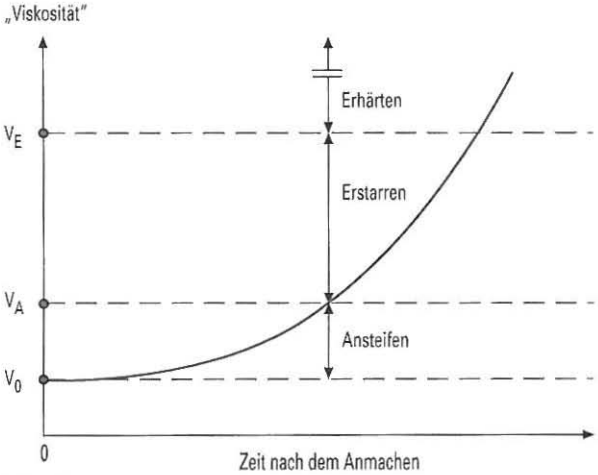


Bild I.5.2-1: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement bei einer Prüfung der Erstarrungszeiten nach DIN 1164

nach dem Erstarrungsende über V_E hinausgehende Viskositätsänderung als Erhärten bezeichnet.

Die bei der Prüfung nach DIN EN 196-3 ermittelten Werte sind nur ein Vergleichsmaßstab und können nicht ohne weiteres auf die Praxis übertragen werden, weil das Erstarren des Betons von zahlreichen weiteren Einflüssen bestimmt wird, wie z. B. vom *Wasserzementwert* und der Frischbetontemperatur.

Nach DIN 1164-1 darf der Erstarrungsbeginn je nach Festigkeitsklasse zwischen 45 und 60 Minuten eintreten, was im Allgemeinen eine für die Praxis ausreichende *Verarbeitungszeit*

bedeutet. Nach der zukünftigen europäischen Norm EN 197-1 sind für den Erstarrungsbeginn je nach Festigkeitsklasse 45 bis 75 Minuten festgelegt. Für Betonwaren ist im Hinblick auf eine frühe Entformung des jungen Betons i. d. R. ein Erstarrungsbeginn nahe am geforderten Mindestwert erwünscht. Umgekehrt wird für Transportbeton häufig ein später einsetzender Erstarrungsbeginn gewünscht, um bei sehr langen Anfahrtswegen die Verarbeitbarkeit des Betons zu erhalten.

Zwischen dem Erstarrungsbeginn und der Geschwindigkeit des sich daran anschließenden Erhärtens besteht zwar kein direkter Zusammenhang, jedoch kann im Allgemeinen unterstellt werden, dass sehr schnell erhärtende Zemente einen deutlich früheren Erstarrungsbeginn (unter zwei Stunden) aufweisen als langsam erhärtende Zemente (zwischen zwei und vier Stunden).

Zement, der unterhalb der für die entsprechende Festigkeitsklasse festgelegten Verarbeitungszeit erstarrt, ist nicht normgerecht, obwohl sich dies auf alle anderen Eigenschaften nicht nachteilig auswirkt, wenn der Beton trotzdem ausreichend verarbeitet und vollständig verdichtet werden kann. Dagegen entwickelt Zement, der schon nach wenigen Minuten unter Wärmeentwicklung erstarrt (früher bei der manuellen Verarbeitung mit einem Löffel als „*Löffelbinder*" bezeichnet), häufig nur unzureichende Eigenschaften. Demgegenüber ist das kurz nach Wasserzugabe beobachtete „*falsche Erstarren*", das ohne Wärmeentwicklung verläuft und auf spontaner Bildung von Gips (*sekundärer Gips*) beruht, häufig durch kurzes Nachmischen zu überwinden, ohne dass Nachteile damit verbunden sind (s. Abschnitt I.4.1.2).

Auch mit Zementen, die bei der Herstellung hinsichtlich des Sulfats optimal eingestellt worden sind, kann bei der Beton-

herstellung ein frühzeitiges Ansteifen auftreten. So bewirken höhere *Frischbetontemperaturen* nicht nur allgemein einen schnelleren Ablauf von chemischen Reaktionen, sondern sie verschieben auch das Optimum des Sulfatzusatzes. Höhere Frischbetontemperaturen bewirken bei allen Zementen eine Zunahme des Ansteifens und eine Abnahme des Erstarrungsbeginns, weshalb in DIN 1045 für diesen Fall gesonderte Erstprüfungen gefordert werden.

Betonzusätze, die sich auf die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements in den ersten Stunden nach dem Anmachen stärker auswirken, können das Ansteifen und Erstarren des Betons gezielt beeinflussen (s. Abschnitt II.2). *Verunreinigungen*, auch in kleinen, unwesentlich erscheinenden Mengen, können das Erstarren deutlich verkürzen oder verlängern. Z. B. können geringe Mengen *Zucker* oder zuckerähnlicher, organischer Stoffe das Erstarren und Erhärten vollständig oder für sehr lange Zeit verhindern.

Auch durch eine nicht sachgerechte *Lagerung* im Silo oder beim Transport kann sich das Erstarren verändern, insbesondere durch Reaktionen mit Wasserdampf sowie *Kohlendioxid* der Luft. Es empfiehlt sich daher, länger gelagerten Zement vor dem Verarbeiten auf sein Erstarren – insbesondere auf eine Verkürzung des Erstarrungsbeginns – zu überprüfen. Hierzu reicht gewöhnlich eine vereinfachte Prüfung, die auch auf der Baustelle ohne großen Aufwand durchzuführen ist. Dabei wird eine Zementprobe von Hand mit knapp 30 M.-% Wasser angemacht, sodass ein steifer Brei entsteht, den man anschließend vor Austrocknen geschützt (Gefäß mit Deckel) lagert. Der Zementleim muss nach einer Stunde noch leicht verformbar und nach zwölf Stunden fest sein.

5.3 Wasseranspruch

Der *Wasseranspruch* des Zements zur Herstelllung von Zementleim mit festgelegter Konsistenz (z. B. Normsteife) ergibt sich im Wesentlichen aus zwei Anteilen. Der überwiegende Anteil des Zugabewassers dient dazu, die Hohlräume zwischen den Partikeln einer Zementschüttung zu füllen und die Partikel mit einem Wasserfilm zu überziehen, bis sie sich gegeneinander frei verschieben können. Dieser physikalisch bedingte Wasseranspruch liegt in der Größenordnung von 25 bis 30 M.-% und steigt mit zunehmender massebezogener Oberfläche, insbesondere mit enger werdender *Korngrößenverteilung*. Bei konstanter massebezogener Oberfläche bewirkt ein Anstieg des Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung des Zements von n = 0,9 auf n = 1,1 eine Zunahme des physikalischen Wasserbedarfs um etwa 5 bis 6 M.-%. Dieser Anstieg ist auf ein zunehmendes Hohlraumvolumen zwischen den Zementpartikeln zurückzuführen [Res1]. Dieser Effekt kann sich z. B. beim gemeinsamen Mahlen von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen unterschiedlicher Mahlbarkeit (z. B. Klinker und Hüttensand) bemerkbar machen. So nimmt beispielsweise in hüttensandhaltigen Zementen der Wasseranspruch insbesondere bei größeren Hüttensandanteilen zu. In diesen Fällen kann durch verfahrenstechnische Maßnahmen, z. B. durch getrenntes Mahlen und Mischen (s. Abschnitt I.3.2.3) oder durch Zumischen kleiner Anteile von sehr feindispersen Stoffen mit geringer Reaktivität und breiter Partikelgrößenverteilung, der Wasseranspruch für die Normkonsistenz vermindert werden. Außerdem wird die Partikelgrößenverteilung des Zements durch das verwendete *Mahlsystem* und die Betriebsweise der Mahlanlage beeinflusst [Müll].

Ein geringerer Teil des Zugabewassers wird für die Anfangshydratation der Zementbestandteile verbraucht. Auch dieser

Teil des Wasseranspruchs steigt mit zunehmender Mahlfeinheit des Zements leicht an. Eine Steigerung der Oberfläche um 1000 cm^2/g führt bei sulfatoptimierten Zementen zu einer Erhöhung des chemisch bedingten Wasserbedarfs um maximal 1 M.-% [Sch5]. Darüber hinaus werden geringe Wassermengen zur Benetzung der im Frühstadium der Hydratation entstandenen Hydratationsprodukte benötigt.

5.4 Verarbeitbarkeit

Die *Verarbeitbarkeit* des Betons wird überwiegend von der Kornzusammensetzung des Zuschlags sowie von der Menge und der Konsistenz des Zementleims bestimmt. Bei durchschnittlicher Betonzusammensetzung ist der Einfluss eines sulfatoptimierten Zements auf die Verarbeitbarkeit gering; im Wesentlichen macht sich nur eine stark von den durchschnittlichen Verhältnissen abweichende Mahlfeinheit des Zements auf die Verarbeitbarkeit von zementarmen oder zementreichen Betonmischungen etwas stärker bemerkbar. Veränderungen der Mahlfeinheit innerhalb des mittleren Bereichs wirken sich auf die Verarbeitbarkeit von Mörtel und Beton praktisch nicht aus, werden daher in der Praxis im Allgemeinen nicht wahrgenommen [Ren1].

Grobe Zemente haben ein geringeres Wasserrückhaltevermögen und neigen daher zum Absondern von Wasser (*Bluten*). Bei zementarmen Betonmischungen aus Zuschlag mit geringem Feinstsandgehalt liefern sie daher einen „kurzen" Mörtel oder Beton, der etwas Wasser absondert, sich leichter entmischt und weniger gut verarbeiten lässt. Vorteilhaft wirkt sich insbesondere bei grob gemahlenen Zementen eine Zumahlung von bis zu 5 M.-% Rohmehl oder Puzzolan aus, die aufgrund ihrer leichteren Mahlbarkeit sehr fein aufgeteilt werden und daher

die Neigung zum Wasser absondern stark herabsetzen. Dies wirkt sich beispielsweise auf die Verarbeitbarkeit von Pumpbeton oder bei der Herstellung von Sichtbeton günstig aus. Eine ähnliche Wirkung lässt sich auch durch die Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen (z. B. CEM II) oder durch die Zugabe fein gemahlener Gesteinsmehle oder anderer *Zusatzstoffe*, wie z. B. Puzzolanen oder Flugaschen, sowie durch Zugabe luftporenbildender oder stabilisierender Zusatzmittel zum Beton erreichen. Solche Zusätze werden nicht verwendet, wenn ein Wasser absondern gewünscht wird, wie z. B. bei der Herstellung von Schleuderbeton oder von Faserbeton.

Zemente mit einem erhöhten Wasseranspruch liefern bei niedrigen Wasserzementwerten einen zähklebrigen Zementleim. Für die Verarbeitung und Verdichtung von solchen und zugleich zementreichen Mischungen ist daher ein höherer Aufwand erforderlich. In der Praxis wird jedoch häufig ein höherer Wasserzusatz gewählt, der Festigkeitseinbußen zur Folge hat.

5.5 Erhärten und Festigkeit

Der Festigkeitsbeitrag, den ein Zement im Beton liefert, wird durch seine Normdruckfestigkeit beurteilt. Unter sonst gleichen Bedingungen steigt die Betonfestigkeit praktisch linear mit der *Normdruckfestigkeit* des Zements an (s. Abschnitt II.2.1).

Bei der Bestimmung der Zement-Normdruckfestigkeit nach DIN EN 196-1 wird die Festigkeit eines definierten Normmörtels nach 2- bzw. 7- und 28-tägigem Erhärten unter Wasser von 20 ± 1 °C bestimmt. Das Mischungsverhältnis der Massen an Zement und Normsand im *Normmörtel* beträgt 1 : 3, der Wasserzementwert 0,50. Um nicht in jedem Einzelfall vor der Anwendung die Festigkeit prüfen zu müssen, wird genormter

Zement in verschiedenen *Festigkeitsklassen* hergestellt und geliefert. **Tafel I.5.5-1** enthält die Grenzwerte der Festigkeitsklassen nach DIN 1164-1, bei der sowohl die Anfangsfestigkeit als auch die *28-Tage-Festigkeit* (Normfestigkeit) berücksichtigt werden. Kennzeichnend für die Einteilung der Zemente in Festigkeitsklassen sind gleiche 28-Tage-Zielfestigkeiten innerhalb einer Festigkeitsklasse, die durch eine Mindestfestigkeit und bei den Klassen 32,5 und 42,5 zusätzlich durch einen oberen Grenzwert der Normfestigkeit, festgelegt sind.

Neben der 28-Tage-Normfestigkeit hat die *Festigkeitsentwicklung*, insbesondere die *Anfangsfestigkeit*, nach einigen Tagen, baupraktische Bedeutung, z. B. für das Ausschalen, Vorspannen oder Betonieren bei niedriger Temperatur. Aus Vergleichsgründen wurde für die normal und schnell erhärtenden Zemente zur Kennzeichnung der Anfangsfestigkeit ein Prüftermin nach 2 Tagen festgelegt. Für den langsamer erhärtenden Zement der

Tafel I.5.5-1: Zementfestigkeitsklassen nach DIN 1164-1 (1994)

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit in N/mm²			
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit	
	2 Tage	7 Tage	28 Tage	
32,5	–	≥16,0	≥32,5	≤52,5
32,5 R	≥10,0	–		
42,5	≥10,0	–	≥42,5	≤62,5
42,5 R	≥20,0	–		
52,5	≥20,0	–	≥52,5	–
52,5 R	≥30,0	–		

Klasse 32,5 erwies sich ein Prüftermin nach 7 Tagen als aussagekräftiger.

In der Zementnorm werden für die Anfangsfestigkeit nur Mindestwerte gefordert. Aus rohstoffbedingten Gründen ist es nicht möglich, einen Zielwert sowohl für die 28-Tage-Normfestigkeit als auch für die Anfangsfestigkeit vorzugeben. Die Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 und 42,5, die derzeit mehr als 90% der Erzeugung ausmachen, weisen bei jeweils gleicher 28-Tage-Festigkeit je nach ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Anfangsfestigkeiten auf. Diese Festigkeitsklassen sind daher in Zemente mit normaler *Anfangserhärtung* und solche mit höherer Anfangserhärtung (zusätzliches Kennzeichen *R*) unterteilt worden. In der zukünftigen europäischen Norm EN 197-1 werden die Zemente mit normaler Anfangserhärtung mit dem Buchstaben *N* gekennzeichnet.

Die Festigkeitsentwicklung des aus Wasser und Zement gebildeten Zementsteins ist auch nach 28 Tagen nicht abgeschlossen. Das gilt insbesondere für Zemente, die grob gemahlen sind oder aufgrund ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung langsam erhärten. Die *Endfestigkeit* wird bei normalen Erhärtungstemperaturen um 20 °C erst nach Monaten erreicht, vorausgesetzt, dass der Zementstein im Beton nicht vorher austrocknet. Bezogen auf die 28-Tage-Festigkeit ist bei sehr schnell erhärtenden Zementen mit einem Festigkeitszuwachs von bis zu 10%, bei normal erhärtenden Zementen von 10 bis 25% und bei langsam erhärtenden Zementen von 25 bis 40%, in Einzelfällen sogar bis 50% zu rechnen. Für die Festigkeitsentwicklung des Zementsteins ist es wichtig, dass der Beton oder Mörtel nicht austrocknet. Die mitunter auf Baustellen anzutreffende Auffassung, dass Beton schnell *„austrocknen"* muss, ist für das Bauwerk *schädlich*. Die *Nachbehandlung*sempfindlichkeit von Beton nimmt bei Verwendung von Zementen

mit mehreren Hauptbestandteilen oder bei Einsatz von *Betonzusatzstoffen* zu.

5.6 Raumbeständigkeit

Nach der Zementnorm dürfen nur Zemente ausgeliefert werden, die raumbeständig sind; alle Zemente werden hierauf im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung laufend überprüft. Die *Raumbeständigkeit* kann z. B. durch einen unzulässig hohen Gehalt an *freiem Kalk (Calciumoxid)*, *Magnesia* (*Magnesiumoxid)* oder an Sulfat beeinträchtigt werden. Durch die Bestimmung des Dehnungsmaßes mit dem *Le Chatelier-Ring* nach DIN EN 196-3 im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung wird ein zu hoher Gehalt an freiem Kalk erfasst. Der Gehalt an Magnesia im *Portlandzementklinker* ist auf das unschädliche Maß von 5,0 M.-% und der Gehalt an Sulfat als SO_3 je nach *Zusammensetzung* und *Festigkeitsklasse* des Zements auf 3,5 bis 4,5 M.-%, entsprechend den Festlegungen der DIN 1164-1, begrenzt. Durch chemische Analysen nach DIN EN 196 Teil 2 werden diese Grenzgehalte vom Hersteller überprüft. Darüber hinaus müssen Verunreinigungen beim Transport (z. B. Silofahrzeuge, Schiff) und bei der Zwischenlagerung in Silos durch entsprechende Kontrollmaßnahmen überwacht und ausgeschlossen werden.

5.7 Transportvorgänge im Zementstein

Zementstein besitzt aufgrund des Aufbaus der Hydratationsprodukte kein absolut dichtes Gefüge. So ist das Zementgel immer von Gelporen durchsetzt, die etwa 25 bis 30% des Gelvolumens einnehmen. Oberhalb eines Wasserzementwerts von ca. 0,40 kommen Kapillarporen hinzu, deren Anteil und Größe mit zunehmendem Wasserzementwert stark ansteigt (s. Abschnitt I.4.2.2).

In Mörtel und Beton können außerdem Luftporen und Verdichtungsporen auftreten. **Bild I.5.7-1** gibt einen Überblick von Größen der verschiedenen Porenarten und über mögliche Untersuchungsmethoden. Im Porensystem des Zementsteins können in Abhängigkeit von der Porengröße und dem Feuchtegehalt in den Poren (luft- oder wassergefüllt) Transportvorgänge durch *Diffusion*, *kapillares Saugen* oder *laminare Strömung* bzw. durch Kombination dieser Mechanismen erfolgen.

Im **Bild I.5.7-2** sind diese Transportmechanismen schematisch dargestellt und die treibenden Kräfte für den Transport angegeben. Diffusionsvorgänge von Atomen, Molekülen oder in Wasser

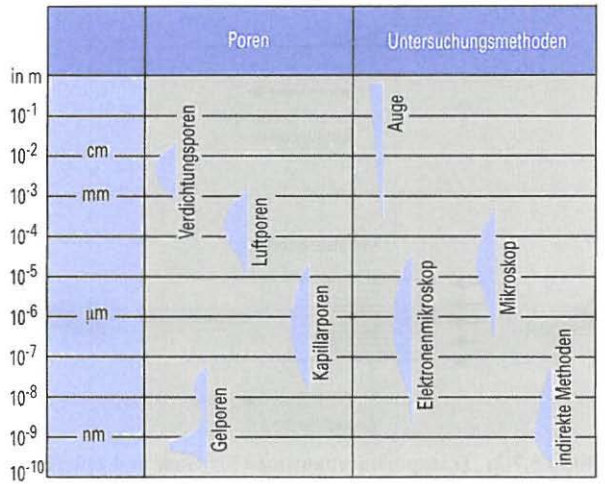


Bild I.5.7-1: Größe der Zementsteinporen und geeignete Untersuchungsmethoden

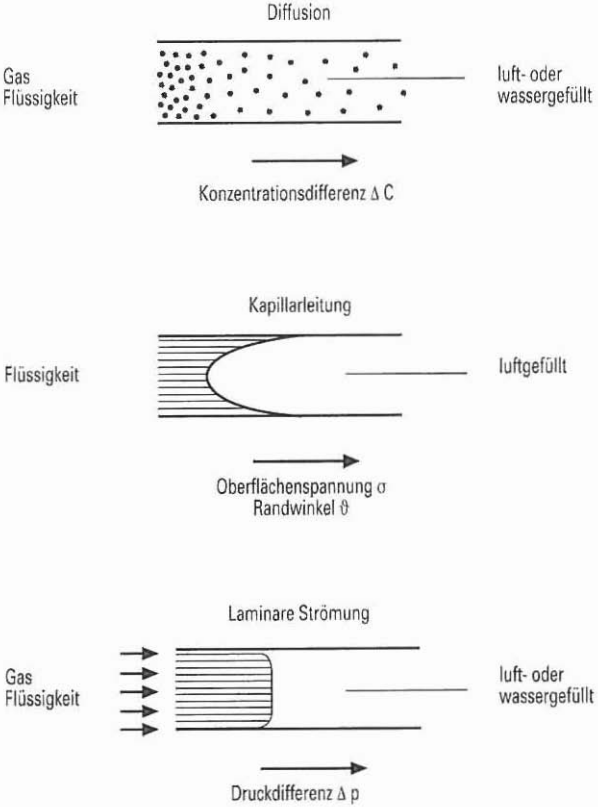


Bild I.5.7-2: Transportmechanismen für Gase und Flüssigkeiten im Zementstein

gelösten Ionen aufgrund von Konzentrationsunterschieden und der Molekularbewegung sind in allen Porenarten möglich. In den sehr kleinen, stets wassergefüllten Gelporen sind die Transportgeschwindigkeiten jedoch äußerst gering.

Da das Zementgel für Gase und Flüssigkeiten praktisch undurchlässig ist, hängt die Dichtheit des Zementsteins weitestgehend vom *Kapillarporengehalt* und von der Kapillarporengröße ab. Dabei ist neben der *Gesamtporosität* und der *Porengrößenverteilung* des Zementsteins die Verbindung der Kapillarporen untereinander von besonderer Bedeutung für die transportierten Stoffmengen. Die durch kapillares Saugen oder durch laminare Strömung unter hohem Druck transportierten Flüssigkeitsmengen sind gering.

Im **Bild I.5.7-3** ist im oberen Teil die *Wasserdurchlässigkeit* von Zementstein in Abhängigkeit vom Kapillarporenanteil aufgetragen [Pow1]. Im unteren Teil ist der Zusammenhang zwischen dem Kapillarporenanteil, dem Wasserzementwert und dem Hydratationsgrad dargestellt [Loc6]. Aus dem Bild geht hervor, dass bis zu einem Kapillarporenanteil von etwa 20 Vol.-% (entsprechend einem w/z-Wert von etwas über 0,50 bei vollständiger Hydratation, bzw. von 0,40 bei einem Hydratationsgrad von 70% oder von 0,30 bei einem Hydratationsgrad von etwa 50%) die Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins sehr klein, praktisch gleich Null ist. Das bedeutet, dass die vorhandenen Kapillarporen untereinander nicht verbunden sind und dass der Stofftransport durch dichte Zementgelstrukturen unterbrochen wird.

Mit zunehmendem Kapillarporenanteil – etwa ab 25 Vol.-% – sind die Poren mehr und mehr untereinander verbunden, und die Wasserdurchlässigkeit steigt stark an. Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,70 hat auch bei vollständiger Hydratation einen so hohen Kapillarporenanteil, dass er wasserdurchlässig bleibt.

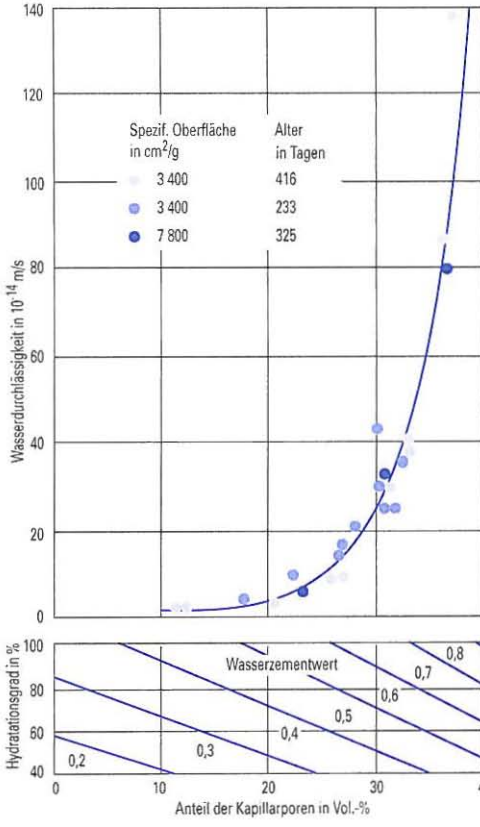


Bild I.5.7-3: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von der Kapillarporosität und vom Wasserzementwert (nach T. C. Powers)

Eine ähnliche Wasserdurchlässigkeit weist Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,50 auf, wenn der Zement nur zu 60% hydratisiert ist, z. B. aufgrund einer ungenügenden Nachbehandlung. Bei erneutem Wasserkontakt kann dieser Zementstein jedoch nachhydratisieren, wodurch die Wasserdurchlässigkeit stark abnimmt. Wird dabei eine fast vollständige Hydratation erreicht, so wird dieser Zementstein durch Nachhydratation praktisch wasserundurchlässig [Grä1].

Der Kapillarporenraum des Zementsteins stellt demnach den Eindringweg für z. B. Gase oder Flüssigkeiten in Mörtel und Betone dar. Der Einfluss des Kapillarporenanteils bzw. des Wasserzementwerts sowie des Kapillardurchmessers auf die Transportmechanismen Diffusion, kapillares Saugen und laminare Strömung geht aus folgenden Beispielen hervor.

In **Tafel I.5.7-1** sind Diffusionskoeffizienten für die Gasdiffusion von Sauerstoff in trockenen Kapillarporen von Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten sowie für die Diffusion von Chloridionen in mit Wasser gesättigten Kapillarporen aufgeführt [Thi1]. Anschaulicher als die Diffusions-

Tafel I.5.7-1: Diffusion von Sauerstoff und Chloridionen in lufttrockenem Beton

Substanz	Wasserzementwert	Diffusionskoeffizient in 10^{-12} m²/s	Diffusionszeit für einen Weg von 1 cm
Sauerstoff (Gas/Gas)	0,70	~30 000 – 300 000	~3 Minuten – 0,5 Stunden
	0,60	~8 000 – 30 000	~0,5 Stunden – 2 Stunden
	0,50	~1 500 – 8 000	~2 Stunden – 10 Stunden
Chloridionen (fest/flüssig)	0,60–0,40	~15 – 0,1	~40 Tage – 15 Jahre

Tafel I.5.7-2: Kapillare Steighöhen für Wasser beim Eindringen in gut benetzbare Materialien unter idealen Bedingungen

Kapillarradius	maximale Steighöhe in m
1 mm	0,015
100 µm	0,15
10 µm	1,5
1 µm	15

koeffizienten sind die Zeiträume, die die diffundierenden Substanzen benötigen, um z. B. eine Wegstrecke von 1 cm zurückzulegen [Klo1]. Diese, für stationäre Diffusionsbedingungen berechneten Zeiten sind ebenfalls in Tafel I.5.7-1 aufgeführt. Daraus geht hervor, dass die Diffusion von Gasen i. d. R. schnell verläuft, sodass selbst dichte, aber trockene Betone üblicher Konstruktionsdicke innerhalb von Tagen von Sauerstoffgas durchdrungen werden können. Bei Kohlenstoffdioxid (CO_2) gelten jedoch andere Regeln (s. Abschnitt II.7.2). Für das Eindringen von Chlorid in die wassergefüllten Kapillarporen dichter Betone werden hingegen Monate oder mehrere Jahre benötigt.

In Kapillaren mit geringem Durchmesser führen kapillare Wechselwirkungen zu sehr großen Steighöhen. In **Tafel I.5.7-2** sind die für Wasser berechneten, theoretischen, maximalen Steighöhen für gut benetzbare Materialien unter idealen Bedingungen in Abhängigkeit vom Kapillarradius aufgelistet. Die in den sehr kleinen Kapillaren transportierbaren, sehr geringen Stoffmengen besitzen baupraktisch keine Bedeutung. Auch steigt der Strö-

Tafel I.5.7-3: Durch kapillaren Wassertransport nach einem Tag vom Beton aufgenommene Wassermengen sowie die dazugehörigen Eindringtiefen [Lun1]

Wasserzementwert	aufgenommene Wassermenge in kg/m²	mittlere Eindringtiefe in cm
0,60	~4,0	~4,5
0,50	~2,5	~2,0
0,40	~1,5	~1,5

mungswiderstand in engen Kapillaren sehr stark an, sodass die maximalen Steighöhen erst nach sehr langen Zeiten erreicht werden [Klo1]. Für die Aufnahme von Wasser und darin gelösten Stoffen in Zementstein oder Beton mit Kapillarporen im Mikrometerbereich ist das kapillare Saugen jedoch der maßgebliche von den in Bild I.5.7-2 gezeigten Transportvorgängen.

In **Tafel I.5.7-3** sind für Betone mit unterschiedlichen Wasserzementwerten, die durch kapillares Saugen nach einem Tag aufgenommenen Wassermengen, in l je m² Beton sowie die dazugehörigen Eindringtiefen aufgeführt [Lun1].

Diese Beispiele unterstreichen noch einmal, welche Bedeutung der Kapillarporenanteil bzw. der Wasserzementwert für die Dichtheit von Zementstein und Betonen, z. B. gegenüber Gasen und Flüssigkeiten, hat. Um Betone mit hoher Dauerhaftigkeit herzustellen, ist deshalb ein niedriger Wasserzementwert des Betons von besonderer Bedeutung. Der Einsatz von Betonzusatzmitteln ermöglicht es heute, Betone mit niedrigen Wasserzementwerten und gut verarbeitungsfähiger Konsistenz herzustellen (s. Abschnitt II.2.4).

5.8 Chemische Widerstandsfähigkeit

Bei einem *chemischen Angriff* auf erhärteten Beton wird zwischen einem *lösenden* und einem *treibenden Angriff* unterschieden. Ein lösender chemischer Angriff wird durch Säuren und bestimmte austauschfähige Salze hervorgerufen. Er löst den Zementstein aus dem Beton heraus. Dieser Vorgang schreitet von außen nach innen fort und ist mit einem Absanden der Betonoberflächen verbunden. Das Treiben wird meist durch Ionen hervorgerufen, die in den erhärteten Beton eindringen, mit bestimmten Hydratphasen des Zementsteins reagieren und dadurch neue Phasen bilden können. Wenn diese *Phasenneubildungen* einen größeren Raum einnehmen als die Ausgangsbestandteile, wird ein *Kristallisationsdruck* im Innern des Betons hervorgerufen, der zu Spannungen führt. Diese Form des chemischen Angriffs ist zunächst nicht äußerlich erkennbar. Der Beton weist unter diesen Voraussetzungen häufig eine höhere Festigkeit auf. Werden die Spannungen so groß, dass die *Zugfestigkeit* des Betons überschritten wird, zerreisst das Gefüge. Es kommt zu *Treiberscheinungen* und *Rissbildung*.

Aggressive Gase, wie *Schwefelwasserstoff* oder *Schwefeldioxid*, können ebenfalls in den Beton eindringen und bei Feuchtigkeit mit Bestandteilen des Zementsteins reagieren. Gasförmiges *Kohlendioxid* reagiert zusammen mit Wasser in erster Linie mit dem Calciumhydroxid des Zementsteins und bildet *Calcit* (*Calciumcarbonat* $CaCO_3$).

5.8.1 Lösender Angriff

Beton ist gegenüber einem sehr starken lösenden Angriff, wie z. B. durch starke Säuren, nicht widerstandsfähig. Zweckmäßig zusammengesetzter Beton kann jedoch gegen schwachen und starken Angriff einen hohen *Angriffswiderstand* entwickeln.

Hüttensandreiche Hochofenzemente weisen gegenüber den meisten lösenden Angriffen eine graduell höhere Widerstandsfähigkeit auf als andere Normzemente, jedoch ist der Unterschied der verschiedenen Zementarten im Vergleich zur Bedeutung der Gefügedichtigkeit gering. Dementsprechend können alle Zemente als praktisch gleich widerstandsfähig gegen lösenden Angriff bezeichnet werden [Wis1] (s. Abschnitt II.7.3.1).

5.8.2 Treibender Angriff

Erhärteter Zementstein muss raumbeständig sein, d. h. es dürfen keine Treiberscheinungen auftreten, die das Betongefüge zerstören können. Bei den chemischen Vorgängen im Beton, die dennoch Treiben hervorrufen, wird zwischen *Kalk-*, *Magnesia-*, *Sulfat-* und *Alkalitreiben* unterschieden. Beim Einsatz normgerecht zusammengesetzter Zemente (s. Abschnitt I.5.6) im Beton tritt Kalk- und Magnesiatreiben nicht auf. Ein Alkalitreiben ist dann zu erwarten, wenn neben Betonzuschlag, der alkaliempfindliche Kieselsäure enthält, auch ein erhöhter wirksamer *Alkaligehalt* in der Porenlösung und vor allem Feuchtigkeit vorhanden sind (s. Abschnitt II.7). Eine Schädigung unterbleibt, wenn Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (*NA-Zemente*, s. Tafel I.2.2-3) eingesetzt werden. Beim Sulfattreiben wird zwischen *Gips- und Ettringittreiben* unterschieden. Eine besondere Art des *Sulfatangriffs* ist die Bildung von *Thaumasit*, die über eine Auflösung des Zementsteingefüges zu einer Entfestigung führt. (Im englischen Sprachgebrauch wird diese Art der Schädigung als TSA = Thaumasite Form of Sulphate Attack bezeichnet.)

Gipstreiben

Bei der Hydratation des Klinkeranteils im Zement entstehen aus den Calciumsilicaten Alit und Belit Calciumsilicathydrate und

Calciumhydroxid. Das bei der Zementhydratation gleichzeitig in Lösung gehende Aluminat und der Sulfatträger reagieren normalerweise zu Ettringit, sodass in der Porenlösung die Konzentration an Sulfationen verarmt. Erst wenn *Sulfationen* z. B. aus Zuschlag oder von außen in den erhärteten Beton gelangen, kommt es zur Reaktion zwischen Calciumhydroxid und Sulfat unter Bildung von Gips $CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$, der durch den *Kristallwachstumsdruck* Treibschäden verursachen kann. Die Höhe der Schädigung hängt dabei von der Menge des zugeführten Sulfats sowie des vorhandenen Calciumhydroxids im Zementstein ab.

Ettringittreiben

Bei der Hydratation des Aluminats C_3A aus dem Klinkeranteil des Zements entsteht in Gegenwart von Calciumsulfat spontan Ettringit (*primärer Ettringit*) $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\ CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$, der sich mit steigender Hydratationsdauer aufgrund eines Überangebots an Aluminathydrat in *Monosulfat* umwandelt [Kal1, Ait1]. Das ist dann der Fall, wenn die Sulfatkonzentration von 8,6 mg SO_3/l in der Porenlösung unterschritten wird [D'An1]. In älteren Betonen wird jedoch häufig kein Monosulfat, sondern wiederum Ettringit nachgewiesen [Lud2, Gho1, Mor1, Pun1, Hei1, Yan1, Joh1]. Diese Rückbildung aus Monosulfat in Ettringit wird damit erklärt, dass Ettringit gegenüber Monosulfat bei Raumtemperatur die stabilere Phase ist [D'An1, Jon1, Mce1].

Bei der *Wärmebehandlung* von Beton wird nach dem derzeitigen Erkenntnisstand bei nicht ausreichender Vorlagerung der größte Teil des in Lösung gegangenen Sulfats des Zements nicht chemisch in Ettringit, sondern adsorptiv an Calciumsilicathydrate gebunden. Dieses physikalisch gebundene Sulfat ist jederzeit mobilisierbar und kann unter geeigneten Bedingungen und zu einem späteren Zeitpunkt Ettringit bilden [Odl2, Syl1].

Deshalb sollte die Temperatur bei der Wärmebehandlung des Betons 60 °C nicht überschreiten [Law1, Ri17] und eine ausreichende *Vorlagerung* eingehalten werden, um die primäre Ettringitbildung nicht zu behindern [Kel1]. Tritt eine Betonzerstörung durch Neubildung von Ettringit im erhärteten Zementstein auf, wird von einer Schädigung durch *sekundäre Ettringitbildung* gesprochen (SEB, im englischen Sprachgebrauch DEF = Delayed Ettringite Formation). Die Ursache für die schädigende verzögerte Ettringitbildung ist bisher noch nicht vollständig geklärt. Sie wird offensichtlich von der Zusammensetzung des Zements, von den Konzentrationsverhältnissen und dem pH-Wert in der *Porenlösung* des Betons beeinflusst [Her1, Cha1]. Zemente mit geringeren C_3A- und Sulfatgehalten vermindern dabei das Risiko einer schädigenden sekundären Ettringitbildung. Nach [Met1] wird Ettringit, der in Poren und Gefügestörungen in größeren Kristallen (10 bis 100 µm) vorhanden ist, als festigkeitssteigernd und nicht treibend angesehen. Dieser Typ entsteht bei niedrigen Hydroxidionenkonzentrationen (OH^-) im Beton. Bei sehr hohen OH-Ionenkonzentrationen, wie sie während der Hydratation von Portlandzement vorliegen, werden zunehmend kleine, 1 bis 2 µm lange, stäbchenförmige Kristalle gebildet, die bei pH-Werten über 13,5 durch *Wasseradsorption* Treiberscheinungen verursachen können [Met2].

Schädigung durch Thaumasit

Thaumasit ist ein Calciumsilicatcarbonatsulfathydrat $CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15\ H_2O$ und wie Ettringit seit langem als natürlich auftretendes Mineral bekannt. In zementgebundenen Bauteilen ist es erst in den 60er-Jahren entdeckt worden. Für seine Bildung müssen Kieselsäure, Carbonat, Sulfat und Wasser sowie Calcium vorhanden sein.

Calcium liegt im erhärteten Zementstein als Calciumhydroxid und in der Porenlösung als Calciumion vor. Sulfat ist über den Erstarrungsregler Bestandteil des Zements und im Zementstein normalerweise an Aluminat fest gebunden. Maßgebend ist jedoch die Sulfatzufuhr von außen durch Einwirkung sulfathaltiger Wässer und Böden auf den Zementstein. Kieselsäure ist in den hydratisierten und nicht hydratisierten Calciumsilicatverbindungen im Zementstein gebunden. Carbonat kann z. B. aus dem Zuschlag stammen oder durch *Carbonatisierung* des Zementsteins gebildet werden. Zwischen Ettringit und Thaumasit gibt es eine lückenlose *Mischkristallreihe* [Kol1].

Umfangreiche Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie haben gezeigt, dass durch Carbonatisierung unter bestimmten Bedingungen Calciumaluminatsulfat- und Calciumsilicathydrate zerstört werden können. Hierdurch geht einerseits Sulfat in Lösung, und es entsteht andererseits reaktionsfähige Kieselsäure. Diese Produkte der Carbonatisierung können jedoch nur bei Temperaturen $< 10\,°C$ bei gleichzeitiger Anwesenheit von CO_2, Calcium und Wasser zu Thaumasit reagieren und eine Betonschädigung durch Verlust der *Gefügefestigkeit* verursachen [Syl1].

In England wurden in letzter Zeit Schäden an Fundamentbetonen bekannt, die Kalkstein mit hohen Feinstanteilen als Zuschlag enthielten. Die Schädigung machte sich nicht in Form von Rissen bemerkbar, vielmehr löste sich das Zementsteingefüge von der Oberfläche her fortlaufend bereits nach wenigen Jahren auf. Als schädigende Ursache wurde die Bildung von Thaumasit in Folge eines Angriffs schwefelsäurehaltiger Wässer von außen nachgewiesen [Rep1]. Derartige Schädigungen wurden in Deutschland bisher nicht beobachtet.

5.8.3 Carbonatisierung

Bei der Zugabe von Wasser zum Zement nimmt die entstehende Lösung sehr schnell einen *pH-Wert* von über 12,5 an, weil *Alkalien* und *Calciumhydroxid* $Ca(OH)_2$ in Lösung gehen. Das Calciumhydroxid entsteht überwiegend bei der Hydratation des Tricalciumsilicats. Die *Löslichkeit* von Calciumhydroxid ist abhängig von der Temperatur und von den in der Lösung vorhandenen Bestandteilen. Bei 20 °C lösen sich 0,165 g $Ca(OH)_2$ in 100 ml Wasser. Mit steigender Temperatur und mit zunehmender Alkalikonzentration nimmt die Löslichkeit ab. Wird bei fortschreitender Zementhydratation die Sättigungsgrenze (Löslichkeitsprodukt) überschritten, fällt Calciumhydroxid als Feststoff aus, das im Zementstein in Form von Calciumhydroxidkristallen (Portlandit) eingebettet ist.

Der *Korrosionsschutz* des Bewehrungsstahls wird vom pH-Wert des ihn umgebenden Mediums bestimmt. Bei einem pH-Wert über 10 bildet sich auf der Stahloberfläche eine *Passivschicht* aus, die den Stahl auch bei Feuchtigkeit in Gegenwart von Sauerstoff vor Korrosion schützt. *Chloridionen* dagegen können die Passivschicht an der Stahloberfläche durchbrechen und lokale Korrosion (Lochfraß) hervorrufen. Sinkt der pH-Wert infolge *Carbonatisierung* unter 9, so wird die Passivschicht angegriffen, und der Stahl beginnt bei Feuchtigkeits- und Sauerstoffzufuhr auf der gesamten Fläche zu rosten.

Es kommt zur Carbonatisierung, wenn der Zementstein langsam austrocknet und dabei CO_2, das in der Luft mit einem Volumenanteil von etwa 0,03% vorhanden ist, in die feinen Kapillarporen eindringen kann. Es löst sich in den dünnen Wasserfilmen, die die Poren auskleiden. Dabei kann der pH-Wert in der Porenlösung auf etwas unter 9 sinken. Bei höheren CO_2-Gehalten, z. B. in Schornsteinen, kann der pH-Wert unter den Neutralwert von 7 auch in den sauren Bereich absinken. Die gebildete *Koh-*

lensäure reagiert dann mit dem Calciumhydroxid unter Bildung von Calciumcarbonat. Hauptsächlich wird dabei Calcit als Calciumcarbonatmodifikation gebildet, gelegentlich treten auch *Vaterit* und *Aragonit* auf, die insbesondere in Verbindung mit hüttensandreichen Zementen festgestellt wurden. Vaterit und Aragonit sind instabil und wandeln sich mit der Zeit in Calcit um. Außerdem sind sie gegenüber Chloridlösung weniger beständig als Calcit und können sich unter Tausalzbeanspruchung auflösen und somit die *Kapillarporosität* wieder erhöhen. Da der Calcit etwa 10% mehr Raum beansprucht als das Calciumhydroxid, aus dem er entstanden ist, wird die Festigkeit des Zementsteins durch die Carbonatisierung nicht vermindert, sondern erhöht.

Die Carbonatisierung im Zementstein schreitet von außen nach innen fort. Die *Carbonatisierungstiefe* kann am einfachsten und mit hinreichender Genauigkeit mit dem *Phenolphthalein-Indikatortest* bestimmt werden. Dazu wird eine frische Bruchfläche des Zementsteins mit einer 1%-igen alkoholischen Phenolphthaleinlösung besprüht. Dabei bleibt der Bereich unterhalb eines pH-Werts von 9 farblos. Bei höheren pH-Werten wird der Zementstein rot angefärbt. Die carbonatisierte Schicht lässt sich noch genauer mikroskopisch im *Dünnschliff* anhand der hohen *Doppelbrechung* des Calcits bestimmen. Im Laufe der Zeit wird nicht nur das bei der Hydratation der Calciumsilicate abgespaltene Calciumhydroxid carbonatisiert, sondern auch die übrigen Hydratphasen. *Calciumsilicathydrate* wandeln sich im Carbonatisierungsbereich in Calciumcarbonat und *Kieselgel* um. Aus *Ettringit* entstehen Calciumcarbonat, *Aluminiumhydroxid* und *Gips*, sowie aus *Monosulfat* und Tetracalciumaluminathydrat *Monocarbonat*. Als Folge des Carbonatisierens schwindet der Zementstein. Dieser Vorgang wird als *Carbonatisierungsschwinden* bezeichnet. Die Menge des gebildeten Calciumcarbonats

und die Carbonatisierungstiefe werden insbesondere durch die Porosität und Durchlässigkeit des Zementsteins gefördert. Ein ausreichend hoch bemessener Mindestzementgehalt, ein ausreichend geringer w/z-Wert, ein genügend hoher Alkalipuffer sowie eine sorgfältige Nachbehandlung verringern die Carbonatisierungsgeschwindigkeit auf ein technisch tolerierbares Maß [VDZ1, Wal1]. Bei Bauwerksuntersuchungen wurde beobachtet, dass bei den in Deutschland vorherrschenden Feuchtebedingen kein signifikanter Unterschied in der Carbonatisierungstiefe von Betonen mit Portlandzementen oder Hochofenzementen vorliegt [Nei1].

Die Aufnahme von Kohlensäure ist stark vom *Feuchtigkeitszustand* des Zementsteins abhängig. Zementstein, dessen Poren mit Wasser gefüllt sind, carbonatisiert nicht oder nur sehr langsam, weil das Wasser die Diffusion von Kohlendioxid in den Zementstein verhindert. Beim Austrocknen des Zementsteins vermindert sich der Wassergehalt im Porensystem. Relative Luftfeuchtigkeiten der Umgebung zwischen 50 und 70% fördern die Carbonatisierung am stärksten und verhindern diese unter 30% vollständig. In Mitteleuropa treten derart trockene Umweltbedingungen nicht oder nur sehr kurzzeitig auf.

Bauteile, die im Freien dem Niederschlag ausgesetzt sind, carbonatisieren wesentlich langsamer als gleiche Bauteile, die vor Niederschlag geschützt sind. Um carbonatisieren zu können, muss erst das bei Niederschlag aufgenommene Wasser verdunsten. In Bereichen mit konstanter Temperatur und mittlerer Luftfeuchtigkeit ist der Carbonatisierungsfortschritt in erster Näherung proportional der Quadratwurzel aus der Zeit, d. h. die Carbonatisierungsgeschwindigkeit wird mit zunehmender Zeitdauer geringer (s. Abschnitt II.7).

5.8.4 Sulfatwiderstand

Für den *Sulfatwiderstand* von Zementstein im Beton sind die chemische Sulfatempfindlichkeit der hydratisierten und noch nicht hydratisierten Bestandteile des Zements sowie die Fähigkeit des Zementsteins im Beton, die Diffusion der Sulfationen zu behindern, verantwortlich. Sulfathaltige Wässer, Böden und Gase greifen üblich zusammengesetzten Beton mehr oder weniger stark an. Übersteigt die Sulfatkonzentration eine bestimmte Schwelle, so ist ein Beton mit hohem Sulfatwiderstand erforderlich. Solche Betone müssen eine hohe *Dichtigkeit* und *Festigkeit* aufweisen. Wenn die Sulfatkonzentration der angreifenden Lösung 600 mg SO_4^{2-}/l übersteigt, müssen Zemente mit hohem Sulfatwiderstand, d. h. mit *HS-Eigenschaft* (s. Abschnitt I.2, Tafel I.2.2-3) eingesetzt werden. Bis zu einer Sulfatkonzentration von 1500 mg SO_4^{2-}/l im angreifenden Wasser können auch Bindemittelgemische aus Normzementen und 20 bis 40 M.-% bei Portlandölschieferzement und Hochofenzement (CEM III/A) mehr als 10 M.-% Steinkohleflugasche nach DIN EN 450 verwendet werden (s. Abschnitt II.7) [DAfI].

Durch den Einsatz von HS-Portlandzementen wird das Reaktionspotential an neu gebildeten dehnungsfördernden Phasen aufgrund des geringen C_3A- und Al_2O_3-Gehalts eingeschränkt. Mit diesen Zementen bildet sich nur in geringem Umfang Ettringit, der zudem aufgrund eines höheren Eisengehaltes im Ettringitgitter und einer damit verbundenen anderen Morphologie eine geringere Treibwirkung hervorruft. Der hohe Sulfatwiderstand der hüttensandhaltigen Zemente beruht in erster Linie auf der Verminderung der Sulfatdiffusion durch die besondere Gefügedichtigkeit des Zementsteins, darüber hinaus auf dem Verdünnungseffekt des C_3A-Gehalts im Portlandzementklinkeranteil durch Hüttensand und auf dem damit verbundenen geringeren Anteil des bei der Hydratation des Zements gebildeten $Ca(OH)_2$.

Puzzolanisch reaktionsfähiges Al_2O_3 als Oxid oder als Bestandteil von Puzzolanen kann das chemische Reaktionspotential von Zementstein gegenüber Sulfat steigern.

Um Zemente unabhängig von ihrer Zusammensetzung nach ihrer chemischen Sulfatwiderstandsfähigkeit einzuordnen, werden Prüfverfahren, die als *Schnellprüfverfahren* ausgelegt sind, eingesetzt. Dabei werden z. B. in ihrer Konzentration stark überhöhte Salzlösungen verwendet, die nicht den natürlichen Gegebenheiten entsprechen. Außerdem wird bewusst eine Schwächung des Zementstein- und Betongefüges, z. B. durch eine erhöhte Gefügeporosität oder durch Wahl von Prüfkörpern mit höheren Oberflächen/Volumen-Verhältnissen herbeigeführt [Koc1, Wit1, Loc6]. Aus zahlreichen Vergleichungsuntersuchungen ging bisher hervor, dass sowohl die Reproduzierbarkeit wie auch die Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse unbefriedigend sind und daher noch Forschungsbedarf für eine Normung eines dieser Prüfverfahren besteht.

Sulfate dringen von außen als wasserlösliche Sulfate, wie z. B. *Natriumsulfat* Na_2SO_4, *Magnesiumsulfat* $MgSO_4$ oder *Calciumsulfat* $CaSO_4$ in den Beton ein und reagieren chemisch unter *Volumenvergrößerung* mit den Bestandteilen des Zementsteins. Einige der möglichen Reaktionen sind in **Tafel I.5.8-1** zusammengestellt. Als Reaktionspartner von Calciumsulfat kommen nur Aluminathydrate (z. B. C_4AH_{19}) oder Monosulfat ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$) in Frage. Als Reaktionsprodukt entsteht Ettringit. Die Löslichkeit von $CaSO_4$ in Wasser ist dabei auf 1,34 g SO_4^{2-}/l begrenzt. Damit ist der Angriffsgrad, definiert nach DIN 4030, als „stark" zu bezeichnen. Für eine Schnellprüfung ist diese Lösungskonzentration als schwach einzustufen. Als Reaktionspartner für Na_2SO_4 stehen im Zementstein Calciumhydroxid, Aluminathydrat und Monosulfathydrat zur Verfügung, die zu Gips, Monosulfat und Ettringit reagieren kön-

Tafel I.5.8-1: Reaktionen von angreifenden Sulfaten mit Bestandteilen des Zements und die dabei vorwiegend entstehenden Reaktionsprodukte

angreifendes Medium	Reaktionspartner im Zementstein	Reaktionsprodukt
$CaSO_4$	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$	$3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\ CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$
Na_2SO_4	$Ca(OH)_2$ $4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\ CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$
$MgSO_4$	$Ca(OH)_2$ $3\ CaO \cdot 2\ SiO_2 \cdot n\ H_2O$ $4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$ $Mg(OH)_2$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\ H_2O$ $3\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\ CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$

nen. Magnesiumhaltige Lösungen verhalten sich sehr ähnlich. Magnesiumsulfat kann darüber hinaus auch mit dem Calciumanteil aus den Silicathydraten unter Bildung von Gips reagieren. Dadurch wird eine Gefügeschwächung beschleunigt, die mit Festigkeitseinbußen, Treiberscheinungen und verstärkter Sulfatdiffusion verbunden ist. Durch Bildung von *Magnesiumhydroxid* $Mg(OH)_2$ auf der Betonoberfläche kann die Sulfatdiffusion behindert werden. Normalerweise liegen alle drei Salze in gelöster Form im angreifenden Wasser vor, sodass die chemischen Reaktionen außerordentlich komplex verlaufen [Wis1].

5.9 Umweltverträglichkeit (Auslaugen/Ausgasen)

Jeder Zement enthält geringe Mengen an Spurenelementen, die im Wesentlichen durch die natürlichen Einsatzstoffe, wie z. B. Kalkstein und Ton, eingetragen werden. Dabei wird die Spannweite der *Spurenelementgehalte* in den Einsatzstoffen durch die

geochemische Verteilung in den Lagerstätten bestimmt. Werden natürliche Einsatzstoffe im heute üblichen Rahmen, der sich aus den Anforderungen an die Produktqualität und an die technische Eignung ergibt, teilweise durch sekundäre Roh- oder Brennstoffe ersetzt, können sowohl geringfügige Erhöhungen als auch Verminderungen der Spurenelementgehalte auftreten. Diese Veränderungen werden in den meisten Fällen durch die natürlichen Konzentrationsschwankungen in den primären Einsatzstoffen überlagert.

In **Tafel I.5.9-1** sind die Spannweiten der Gehalte einiger Spurenelemente in deutschen Portlandzementen zusammengestellt. Diese Spannweiten entsprechen weitgehend dem Konzentrationsbereich von Spurenelementen in natürlichen Böden. Die Spurenelemente liegen in den Zementen als schwer lösliche Verbindungen vor. Eine Ausnahme bildet das Element Chrom. Die geringen Mengen, die in erster Linie aus der Tonkomponente

Tafel I.5.9-1: Spannweiten der Schwermetallgehalte in Portlandzementen; Angaben in g/t, glühverlustfrei

Element	Spannweite
Blei	5 – 260
Cadmium	0,03 – 6
Chrom	25 – 130
Kobalt	3 – 15
Nickel	20 – 100
Quecksilber	<0,02 – 0,2
Thallium	<0,2 – 4
Zink	20 – 680

des Rohmaterials herrühren, werden beim Klinkerbrennprozess oxidiert und als Chromat Cr(VI) im Klinker gebunden.

Für die Verarbeitung von Mörteln und Betonen ist entscheidend, dass die meisten Schwermetalle, wie Blei, Cadmium, Zink usw., im Zementleim praktisch nicht in löslicher Form auftreten. Alkali- und Chromverbindungen können demgegenüber im Zementleim anfänglich zu einem höheren Anteil gelöst vorliegen. So bilden die Alkalien im Zementleim Alkalihydroxide, die zu pH-Werten von über 12 führen. Bei Chromverbindungen ist davon auszugehen, dass im Zementleim anfänglich 10 bis 20% des gesamten Chroms als Chromat gelöst werden können (Chromatgehalt und Arbeitsschutzmaßnahmen s. Abschnitt I.3.4.2). Mit fortschreitender Hydratation wird das gelöste Chromat in bzw. an die Hydratphasen gebunden und ist im erhärteten Zementstein in praktisch unlöslicher Form enthalten [Pis1].

Die bei der Hydratation des Zements entstehenden Hydratphasen binden nicht nur Spurenelemente, die im Zementleim gelöst sind, sondern darüber hinaus auch noch zusätzliche Spurenelementmengen. Wenn Zementsuspensionen Schwermetalle als wasserlösliche Salze gezielt in hohen Konzentrationen zugegeben werden, werden diese in den meisten Fällen in unlösliche Verbindungen überführt bzw. die *Löslichkeit* wird deutlich reduziert. Im **Bild I.5.9-1** sind die in Lösung verbleibenden Anteile der einer Zementsuspension zugegebenen Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl) und Zink (Zn) dargestellt. Die Suspension enthielt zu Beginn je 2 bis 10 g gelöste Salze der vorgenannten Elemente sowie 70 g Portlandzement je Liter. Der in Lösung verbleibende Anteil wurde nach zweistündiger Kontaktzeit im Filtrat bestimmt. Aus dem Bild geht hervor, dass die Verbindungen der Elemente Blei, Cadmium und Zink in praktisch vollständig unlösliche Formen überführt werden. Beim Thallium liegt der

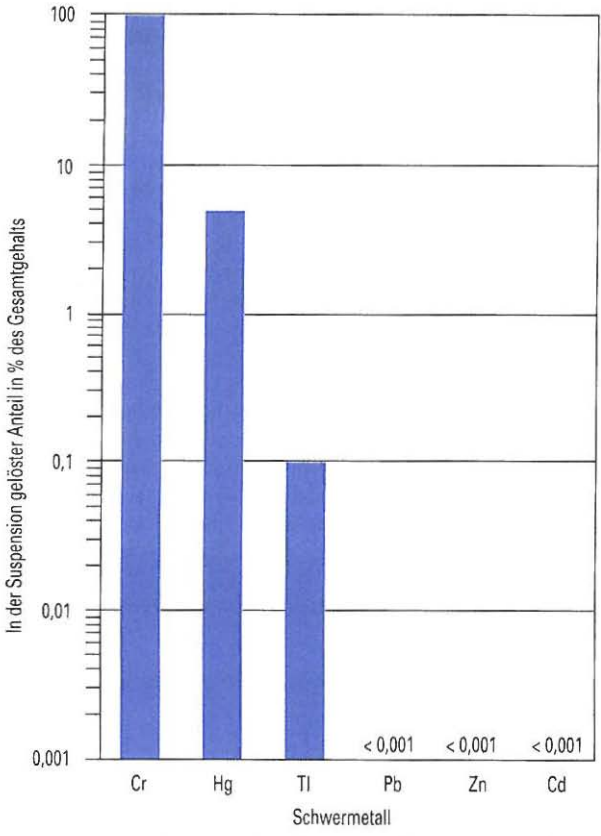


Bild I.5.9-1: In der wässrigen Phase von Zementsuspensionen gelöster Anteil von Schwermetallen, die als wasserlösliche Verbindungen zugegeben wurden. Kontaktzeit: zwei Stunden

gelöste Anteil bei 0,1%, beim Quecksilber bei 5% der zugegebenen Mengen. Lediglich das zugesetzte Chrom bleibt während der kurzen Kontaktzeit vollständig in Lösung. Mit fortschreitender Hydratation nimmt jedoch auch die Konzentration des Chroms rasch ab [Spr4, Spr5].

Bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit von Zementen muss weiterhin berücksichtigt werden, dass sich die Freisetzung von Stoffen mit zunehmender Erhärtung allein durch die Ausbildung des dichten, festen Zementsteingefüges sehr stark vermindert, da im Porenwasser gelöste Substanzen nur durch sehr langsam ablaufende Diffusionsprozesse eluiert werden können. Die treibende Kraft für eine Freisetzung durch Diffusionsvorgänge sind Konzentrationsunterschiede der Stoffe in der *Porenlösung* des Zementsteins und dem auslaugenden Umgebungswasser. Dabei hängt die Konzentration eines Stoffs in der Porenlösung von der Wechselwirkung mit den Hydratationsprodukten ab. *Sorptionseffekte, chemische Bindungsvorgänge* an der Oberfläche der Hydratphasen, *Fällungsreaktionen* mit geeigneten Partnern oder der *Einbau* in das Kristallgitter der *Hydratphasen* vermindern die Konzentrationen von im Porenwasser gelösten Stoffen in erheblichem Maße. Dieser Mechanismus ist für Schwermetalle, aber auch für Betonverflüssiger und Fließmittel untersucht worden [Spa1].

Beton

Kapitel II

1 Übersicht

1.1 Definitionen und Normung

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus mindestens drei Ausgangsstoffen, Zement und Wasser (Zementleim) sowie Zuschlag (i.d.R. Sand, Kies, Splitt usw.), hergestellt wird. Wichtige Stationen der Entwicklung des Baustoffs werden in Abschnitt II.1.2 beschrieben. Nach dem heutigen Entwicklungsstand ist der *Verbundbaustoff Beton* ein *5-Stoff-System* mit den Ausgangsstoffen Zement, Wasser, Zuschlag sowie Zusatzstoffen und Zusatzmitteln (s. **Tafel II.1.1-1**). Beton wird dadurch fest, dass der Zementleim zu Zementstein erhärtet und den Zuschlag zu einem festen Gerüst verbindet. Solange der Beton beliebig verformbar, d. h. verarbeitbar, ist, bezeichnet man ihn als *Frischbeton*. Nach dem Erhärten des Leims nennt man ihn *Festbeton*.

Mörtel unterscheidet sich von Beton nur durch das Größtkorn des Zuschlags, das für Mörtel $\leq$ 4 mm beträgt. Unter Abschnitt II.14 und II.15 werden einige spezifische Mörtel und ihre Leistungsmerkmale beschrieben. Mörtel, der die Eigenschaft von Hochleistungsbeton (s. Abschnitt II.3.1) aufweist, wird im Ausland oft auch als „Beton" bezeichnet.

Bauwerke müssen nach dem *Bauproduktengesetz* die wesentlichen Anforderungen

- der mechanischen Festigkeit und Standsicherheit,
- des Brandschutzes,
- der Hygiene, Gesundheit und des Umweltschutzes,
- der Nutzungssicherheit,

Tafel II.1.1-1: Betonausgangsstoffe

	Bezeichnung	Betonausgangsstoffe	Regelwerk[6]
Matrix	Zementleim bzw. Zementstein	**Zement** **Zugabewasser**	DIN 1164-1[1] DIN 1045 DBV-Merkblatt [Me26]
		Zusatzmittel	bauaufsichtl. Zulassung[2]
		Zusatzstoffe	
	Mehlkorn-suspension („Leim") bzw. Mehlkornmatrix	Flugasche Trass Silicastaub	DIN EN 450[3] DIN 51043 bauaufsichtl. Zulassung[4]
		Pigmente Gesteinsmehl Kunststoffdispersion	DIN EN 12878 DIN 4226 bauaufsichtl. Zulassung
		Fasern	bauaufsichtl. Zulassung
Korngerüst		**Zuschlag, Gesteinskörnung**	DIN 4226[5]
		Hartstoffe für Hartstoffestriche	DIN 1100

[1] Später DIN EN 197-1 für Normalzemente und DIN 1164 für Spezialzemente
[2] Später DIN EN 934-2 und DIN EN 480 ff
[3] Zuzüglich DAfStb-Einführungsrichtlinie bis zur Einführung von E DIN 1045-2
[4] Später DIN EN 13263
[5] Später DIN EN 12620
[6] Ggf. zuzüglich ergänzender Festlegungen in der Bauregelliste [Ri20]

– des Schallschutzes sowie
– der Energieeinsparung und des Wärmeschutzes

erfüllen, und zwar dauerhaft. *Dauerhaftigkeit* bedeutet, dass die verlangten Gebrauchseigenschaften während einer festgelegten Zeitdauer (Nutzungsdauer, Lebensdauer) unter den planmäßigen Beanspruchungen und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit (angemessene Herstellungs- und Instandhaltungskosten) erhalten bleiben (s. E DIN 1045-1 und -2). In der Praxis und im Regelwerk wird mit „Dauerhaftigkeit" ein ausreichender Widerstand des Baustoffs gegenüber Umwelteinwirkungen bezeichnet (s. Expositionsklassen auf Tafel IV.3-1 und IV.3-2 sowie Abschnitt II.7).

Während der *Verarbeitbarkeitszeit* durchläuft der Frischbeton von der Herstellung über Transportieren, Verarbeiten (Fördern, Verteilen, „Einbringen" in Schalung, „Auftragen" auf Flächen, Verdichten, Glätten der Oberfläche) und Nachbehandeln alle Verfahrensschritte, die notwendig sind, damit schließlich aus dem in Form gebrachten Baustoff während der Erhärtung das Bauteil mit den geplanten Gebrauchseigenschaften entsteht.

Die Eigenschaften des Frischbetons und des Festbetons werden durch die verwendeten Ausgangsstoffe sowie deren Eigenschaften und Volumenanteile im Beton bestimmt. Die planmäßige Zusammensetzung zielt darauf hin, dass die Betonbestandteile sich in ihrer Funktion ergänzen und die positiven Eigenschaften des Verbundbaustoffs stärken. Ausgangsstoffe, die miteinander unverträglich sind und z. B. die Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigen, müssen vermieden werden. Die planmäßige Zusammensetzung des Betons erfolgt aufgrund von *Erstprüfungen* oder gleichwertigen Erfahrungsregeln unter Beachtung aller Anforderungen des Regelwerks und des einzelnen Bauauftrags.

Damit die Erstprüfungen zu reproduzierbaren Ergebnissen führen können, müssen die Ausgangsstoffe – innerhalb festgelegter Grenzen – gleich bleibende Eigenschaften aufweisen. Die Ausgangsstoffe müssen deshalb für tragende Bauteile in Deutschland einer bauaufsichtlich eingeführten Norm oder einer entsprechenden bauaufsichtlichen Regelung, z. B. Zulassung, entsprechen (s. Tafel II.1.1-1). Auch die Herstellung und die Verarbeitung des Betons muss bewährten und anwendungsbezogenen Regeln entsprechen, damit Bauwerke mit den geforderten und den zugesicherten planmäßigen Eigenschaften entstehen. Die maßgebenden Normen für Beton, Stahlbeton und Spannbeton sind DIN 1045 (Ausgabe Juli 1988) und DIN 4227 (Teil 1, Ausgabe Juli 1988). Diese Normen wurden in Anlehnung an die entsprechenden europäischen Normentwürfe überarbeitet und als E DIN 1045 neu aufgebaut.

E DIN 1045 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – hat folgende Teile:

Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Ausgabe 1998/12

Teil 2: Beton – Leistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Übereinstimmung – Ausgabe 1999/07

Teil 3: Bauausführung, Ausgabe 1999/02

Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und Überwachung von Fertigteilen, Ausgabe 2000/05

Dieses Taschenbuch orientiert sich an den Festlegungen, wie sie in den 4 Teilen von E DIN 1045 vorgesehen sind. Dies gilt insbesondere für die betontechnischen Darstellungen, die sich auf E DIN 1045-2 beziehen. Hierbei wurden Änderungen der Einspruchsitzungen weitgehend berücksichtigt (Stand März 2000).

E DIN 1045-2 enthält die Festlegungen der europäischen Betonnorm EN 206-1 „Betonleistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität" sowie ergänzende oder abweichende Regelungen dazu, soweit dies für die Anwendung in Deutschland erforderlich ist. E DIN 1045-2 fasst somit die europäische Betonnorm und das zugehörige Anwendungsdokument zusammen und entspricht inhaltlich dem zukünftig in Deutschland geltenden Regelwerk für Beton. E DIN 1045-2 wurde deshalb als Bezugsdokument gewählt. Zur Zeit der Drucklegung des Zementtaschenbuchs 2000 ist noch nicht endgültig geklärt, in welcher Form und unter welchem Titel dieses deutsche Regelwerk für Beton veröffentlicht und bauaufsichtlich eingeführt wird.

E DIN 1045-2 trifft für die baupraktische Anwendung von Beton grundlegende Definitionen im Hinblick auf Betonarten, Betonausgangsstoffe, den Herstellort des Betons sowie die Qualitätssicherung. Eine Auswahl dieser Definitionen ist im Anhang, Tafel IV.3-14, wiedergegeben.

Weiterhin werden in E DIN 1045-1 und E DIN 1045-2 zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Betonanwendung *Klasseneinteilungen* für baupraktisch wesentliche Anforderungen und Leistungsmerkmale vorgenommen (s. **Tafel II.1.1-2**). Diese Klasseneinteilungen betreffen die Einwirkungen aus Last und Zwang (Einwirkungsgruppen) und aus Umwelteinwirkungen *(Expositionsklassen)* sowie die *Verarbeitbarkeit* des Frischbetons *(Konsistenzklassen)*. Weiterhin gibt es Klassen für Festbetoneigenschaften *(Druckfestigkeits-* und *Rohdichteklassen)*, Klassen für die Festigkeitsentwicklung sowie für Beton mit verschiedenen Herstellungsanforderungen. Die entsprechenden Festlegungen sind im Einzelnen in den Tafeln IV.3-1 bis IV.3-11 im Anhang wiedergegeben.

Tafel II.1.1-2: Klasseneinteilungen für Beton nach E DIN 1045-1 und -2: Einwirkungsgruppen, Expositionsklassen, Konsistenzklassen, Größtkornklassen, Betonfestigkeitsklassen, Festigkeitsentwicklungsklassen, Rohdichteklassen, und Betone mit unterschiedlichen Leistungsanforderungen

Klassen	Bezeichnungen
Einwirkungsgruppen	
ständige Einwirkungen (z. B. Eigenlast)	$G_{k,i}$
veränderliche Einw. (z. B. Verkehr, Zwang)	$Q_{k,i}$
außergewöhnl. Einw. (z. B. Anprall)	$A_{k,i}$
vorübergehende Einw. (z. B. Montage)	G
Expositionsklassen (Bewehrungskorrosion)	
carbonatisierungsinduzierte Korrosion	XC1 bis XC4
chloridinduzierte Korrosion	XD1 bis XD3
chloridinduzierte Korr. aus Meerwasser	XS1 bis XS3
Expositionsklassen (Betonangriff)	
kein Angriffsrisiko	XO
chemischer Angriff	XA1 bis XA3
Frost-Tauwechsel-Angriff (ohne/mit Taumittel)	XF1 bis XF4
Verschleißangriff	XM1 bis XM3
Konsistenzklassen (sehr steif, steif, plastisch, weich, sehr weich, fließfähig, sehr fließfähig)	
Größtkornklassen des Zuschlags (größte Korngruppe gemäß DIN 4226 in mm)	z. B. 16 oder 32
Betonfestigkeitsklassen (Druckfestigkeit)	
charakteristische Festigkeit (f_{ck} in N/mm²)	Normalbeton
ermittelt nach 28 Tagen als $f_{ck,\,cyl}/f_{ck,\,cube}$	C8/10 bis C100/115
Zylinder ($f_{ck,\,cyl}$) mit d/h = 150/300 mm	Leichtbeton
Würfel ($f_{ck,\,cube}$) von 150 mm	LC8/9 bis LC80/88
Festigkeitsentwicklungsklassen (schnell, mittel, langsam, sehr langsam)	$f_{cm,\,2}/f_{cm,\,28} \triangleq$ >0,50 bis <0,15
Rohdichteklasse Leichtbeton in 1000 kg/m³	D1,0 bis D2,0
Betone mit unterschiedlichen Leistungsanforderungen	
Standardbeton: Festigkeitsklassen C8/10; C12/15; C16/20, mit Normvorgaben für Zementgehalt, Konsistenz und Größtkorn	
Beton nach Eigenschaften: Entwurfseigenschaften nach Anforderung des Auftraggebers	
Beton nach Zusammensetzung: Betonzusammensetzung nach Vorgaben des Auftraggebers	

Die erstmals festgelegten Expositionsklassen, bezogen auf die Umweltbedingungen, erlauben gegenüber der bisherigen Vorgehensweise eine wesentlich detailliertere Berücksichtigung der Umweltbedingungen beim Betonentwurf. Häufig wird die zu wählende Betonzusammensetzung für ein dauerhaftes Bauwerk stärker durch die Umweltbedingungen als durch statisch konstruktive Vorgaben beeinflusst.

Entwurfskriterien und Zusammensetzung normgemäßer Betone werden im Abschnitt II.3 dargestellt.

1.2 Geschichtliche Entwicklung des Baustoffs Beton und der Betonkonstruktionen

Die Anwendung hydraulisch erhärtender Mörtel und Betone geht auf eine Tradition zurück, die im *Opus Caementitium* der Römer ihren Ursprung hat [Lam1] und im 18. und 19. Jahrhundert wieder verstärkt mit der Anwendung *hydraulischer Kalke* als *Bindemittel* aufgegriffen wird. Als markante Beispiele gelten der Eddistone Leuchtturm von J. Smeaton in England oder die 1816 von L. J. Vicat in Frankreich mit Romanzement gebaute Betonbrücke über die Dordogne bei Souillac. Die Bauwerke waren nicht bewehrt. Wegen der erforderlichen Nacherhärtung der vorwiegend puzzolanischen Bindemittelbestandteile erstreckte sich ihre Anwendung meist auf Wasserbauwerke (Hafenanlagen, Schleusen, Staumauern) oder auf den Tiefbau (z. B. Wasser- und Abwasserkanäle). Bauwerke oder Bauwerksteile, die an Luft erhärteten oder bei Gebrauch der Witterung mit zwischenzeitlicher Austrocknung ausgesetzt waren, wiesen zu dieser Zeit häufig nicht die erforderliche Dauerhaftigkeit auf.

Zur industriellen *Betonanwendung* im Hochbau kam es erst durch die Entwicklung des Zements zu einem ausschließlich

hydraulisch erhärtenden Baustoff mit ausreichend hoher Früh- und Endfestigkeit sowie durch die Einführung des *Bewehrungsstahls* als konstruktives Element zur Erhöhung der Biegezug- und Zugfestigkeit auf der Basis der Entwicklungen von François Coignet und Joseph Louis Lambot [Hac1].

Der Schwerpunkt der *Zementanwendung* zur Herstellung von Mörtel und Beton lag zunächst außer im Wasser- und Tiefbau bei der Herstellung von *Betonwaren*. Verwendet wurden neben Portlandzement auch Gemische aus Portlandzement und Romanzement, wobei die zu der Zeit kurzen Verarbeitbarkeitszeiten der Zemente und Bindemittelgemische nicht von Nachteil bei der überwiegend angewandten *Stampfbetonherstellung* waren. Mit Hilfe dieser Technologie wurden Betonwaren wie Kanalrohre, Dach- und Bodenplatten, plastische Figuren und Reliefs, aber auch Ortbetonbauwerke wie Brücken, Wasserbehälter oder Fundamente und Keller aus wasserundurchlässigem Beton hergestellt [Kla1].

Pionierarbeit in Deutschland leisteten in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts Firmen, wie z. B. A. Sattrée aus Düsseldorf, Dyckerhoff und Widmann aus Karlsruhe (1865), Wayss und Freytag aus Neustadt (1872), Brenzinger & Co. aus Freiburg, oder zum Ende des Jahrhunderts E. Schwenk und Schobinger & Rehfuss aus Ulm. Für den zunehmenden Erfolg der Betonbauweise ausschlaggebend war die Erfahrung in der Auswahl der Einsatzstoffe sowie in der Anpassung des Zement- und Mehlkorngehalts an den von der Zuschlagsieblinie abhängigen Hohlraum und an die geforderten Betoneigenschaften. Hinzu kam vor allem die Sorgfalt bei der industriellen Herstellung von Betonwaren wie auch bei der Ausführung von Ortbetonvorhaben. Zu den wesentlichen *Qualitätskriterien* zählten von Anfang an neben der beliebigen Formbarkeit des Frischbetons die erzielte

Druckfestigkeit, die Raumbeständigkeit, die Wasserundurchlässigkeit, der Widerstand gegenüber Witterungseinflüssen oder angreifenden Bestandteilen in Böden, Grund-, Oberflächen- und Meerwasser sowie der Feuerwiderstand.

Zum Durchbruch der Betonbauweise kam es erst durch die Herstellung von „*Eisenbeton*" (später „*Stahlbeton*") auf der Grundlage der Patente von J. Monier 1867 und 1878. Hiermit verbunden waren auch die ersten Erkenntnisse über den Korrosionsschutz dieser „*Bewehrung*" durch den Zementstein.

1884 erwarben die Firmen Freytag und Heidschuch, Neustadt, und Martenstein u. Josseaux, Offenbach, die Lizenz zur Nutzung dieser Patente, die später von G. A. Wayss erfolgreich bei der Ausführung öffentlicher und privater Bauvorhaben eingesetzt wurde.

Die stürmische Entwicklung, die die Betonbauweise z. B. in Deutschland und Frankreich, aber auch in den USA nahm, war geprägt von den vielfältigen Möglichkeiten, die die neue Bauweise bot. Die Bemühungen verantwortungsbewusster Unternehmer, Konstrukteure und Genehmigungsbehörden waren darauf gerichtet, den Baustoff und das *Betonbauwerk* nach einheitlichen Maßstäben zu berechnen und zu beurteilen. Der damit verbundene technische und wirtschaftliche Fortschritt führte zu ersten grundlegenden Erkenntnissen über den Verbund zwischen Beton und Stahl, den Korrosionsschutz der Bewehrung, die lastabhängigen und lastunabhängigen Verformungen des Baustoffs Beton, die Berechnung der Tragfähigkeit der Konstruktion und die Anforderungen an die Prüfung der Baustoffe.

Meilensteine in Deutschland auf diesem Weg sind: [Hae2, DAf1]

1877 Gründung des Vereins Deutscher Cement-Fabrikanten

1878 Anerkennung der ersten deutschen *Zementnorm*

1886 Grundlegende Untersuchungen an Beton (Korrosionsschutz und Verbund) von Regierungsbaumeister Mathias Koenen

1898 Gründung des *Deutschen Beton-Vereins* (DBV) auf Initiative von Hartwig Hüser (Betonwerk Oberkassel) und Albert Eduard Toepfer (Cement- und Betonwerk Finkenwalde); Eugen Dyckerhoff (Dyckerhoff & Widmann, Betonwerk und Bauunternehmung Biebrich) setzt sich als Vorsitzender des DBV ab 1899 intensiv für klare Qualitätsmaßstäbe für Beton ein

Seit **1901** umfangreiche Betonuntersuchungen am Stuttgarter Materialuntersuchungsamt (Carl Bach und Otto Graf) sowie an der Kgl. Versuchsanstalt Berlin-Lichterfelde (später BAM); Wettstreit um die Vor- und Nachteile von Stampfbeton und plastischem Beton

1902 Koenen veröffentlicht eine Arbeit über die Bemessung von Eisenbetonquerschnitten auf der Grundlage einer linearen Dehnungsverteilung unter Vernachlässigung der Zugfestigkeit des Betons und der Annahme linear-elastischen Verhaltens von Beton und Eisen (n-Verfahren)

1902 Veröffentlichung des Buches „Der Betoneisenbau, seine Anwendung und seine Theorie", dessen technischer Teil von Emil Moersch, dem technischen Direktor der Wayss & Freytag AG, verfasst wurde („Fachwerkanalogie")

1904 Herausgabe der „Vorläufigen Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauten" (LEb) durch den DBV und Einführung darauf basierender „Bestimmungen" in Preußen

1907 Gründung des „Deutschen Ausschusses für Eisenbeton" (seit 1941 *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, DAfStb), in dem alle deutschen Länder und alle interessierten Kreise, Wissen-

schaft, Industrie, Ingenieurvereine und die Bauverwaltung vertreten sind; Ziel: Erarbeitung einheitlicher Vorschriften über die Ausführung von Beton- und Stahlbetonbauten für ganz Deutschland; Veröffentlichung wissenschaftlicher Erkenntnisse in den Heften des DAfStb

1908 Herausgabe der „Allgemeinen Bestimmungen für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton", der „Normung für vergleichende Druckversuche mit Stampfbeton (Laboratoriumsversuche)" und der „Bestimmungen für Druckversuche bei Ausführung von Bauten aus Stampfbeton"

1916 Fertigstellung der „Bestimmungen für Ausführungen von Bauwerken aus Beton" und der „Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton" durch den Deutschen Ausschuss für Eisenbeton und amtliche Einführung in allen deutschen Bundesstaaten

1925 Herausgabe der „Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton vom September 1925", die als Normenblätter 1045 bis 1048 in das Normensammelwerk übernommen wurden

Teil A, DIN 1045: Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton (Mindestzementgehalt 300 kg/m³, vollständige Verdichtung, späterhin auch Anforderungen an die Sieblinie des Zuschlags und an den „Wasserzementwert")

Teil B, DIN 1046: Bestimmungen für Ausführung ebener Steindecken

Teil C, DIN 1047: Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Beton

Teil D, DIN 1048: Bestimmungen für Druckversuche an Würfeln bei Ausführung von Bauwerken aus Beton und Eisenbeton

Seit **1935** Entwicklungen mit *Spannbeton* in Deutschland auf der Basis der Patente von E. Freyssinet [Hac1]

1943/1944 Neufassung und Herausgabe der Normen DIN 1045 bis DIN 1048 sowie DIN 4255 (Fertigbauteile aus Stahlbeton); Einführung der *Betongüteklassen* B 120, B 160, B 225, B 300 nach der 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit (W28); Einführung der *Stahlgüteklassen*, unterschieden nach der Mindeststreckgrenze in den Gruppen I bis IV (a-naturhart, b-kaltgereckt, glatt und profiliert)

1943 Herausgabe der „Vorläufigen Anweisung für die Verwendung von *Innenrüttlern* zum *Verdichten* von Beton", basierend auf Arbeiten von O. Graf, K. Kaufmann und K. Walz

1953 DIN 4227, Herausgabe der ersten Spannbetonnorm

1972 DIN 1045, Neufassung mit n-freiem Bemessungsverfahren

Bis **2000** Erarbeitung einer geschlossenen europäischen Normengrundlage für Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Beratung einer neuen E DIN 1045 mit 4 Teilen (s. Abschnitt II.1.1)

Die Entwicklung der Betonbauweise lässt sich an der zeitlichen Entwicklung der erreichbaren Betondruckfestigkeit verdeutlichen (s. **Bild II.1.2-1**). Durch die zunehmend zuverlässigere Herstellung hat sich die *Betonbauweise*, ausgehend von Betonwaren, immer neue Anwendungsbereiche erschlossen. Hierzu zählen z.B. Fundamente, Rohre und Abwasserentsorgungsanlagen, Wohngebäude, Wasserbehälter, Talsperren, Häfen, Schleusen und Wasserkraftanlagen, Industriegebäude, Brücken, Betonstraßen, Veranstaltungshallen, Kernkraftwerke, Offshoreplattformen [DBV1, Rea1]. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Verdichtungstechnik (Rüttelbeton) und der werkmäßigen Herstellung (Transportbeton, Fertigteilwerke) sind wichtige Meilensteine dieser Entwicklung. Hervorragende Ingenieure haben in Konstruktion, Forschung und Baustoffentwicklung und durch

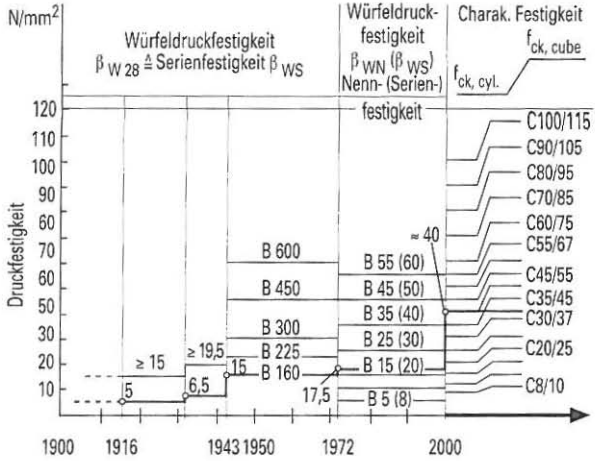


Bild II.1.2-1: Entwicklung der Betondruckfestigkeiten (N/mm²) von Normalbeton (Die blaue Linie zeigt die ungefähre Entwicklung der ausnutzbaren Biegedruckspannungen für die jeweils höchste Festigkeitsklasse.)

die Gestaltung des Regelwerks diese Entwicklung gefördert [DAf1, Hac1, DBV1].

Auf dieser Basis werden sich die Anwendungsmöglichkeiten zementgebundener Baustoffe mit Erfolg erweitern lassen. **Tafel II.1.2-1** zeigt einen Überblick über die Bezeichnungen verschiedener Betone und Mörtel nach bestimmten Eigenschaften, Herstell- oder Verarbeitungsverfahren sowie bestimmten Betonbauwerken.

Tafel II.1.2-1: Bezeichnung von Betonen und Mörteln

Bezeichnung	Abschnitt	Bezeichnung	Abschnitt
nach Eigenschaften		nach Herstellort	
normalfester Beton	1, 3, 5, 8	Baustellenbeton	9.1
hochfester Beton	1, 3, 5	Transportbeton	9.1, 9.2
frühhochfester Beton	5	Trockenbeton, -mörtel	9.1, 14.1
langzeitverzögerter Beton	2, 3		
Normalbeton	1, 3, 5	nach Förderung und Verarbeitung	
Leichtbeton	3, 6	Kübelbeton	9.3
Luftporenbeton	2, 7.1, 12	Pumpbeton	9.3/10.4
Porenbeton	11	Spritzbeton	10.1
Schwerbeton	1	Schleuderbeton	10.2, 11.2/14.4
Dränbeton	12	Rüttelbeton	9.4
Strahlenschutzbeton	2.5	wärmebehandelter Beton	11.2
Faserbeton	2.6	Unterwasserbeton (UW)	10.5/10.5.2
Frischbeton	4	Ausgussbeton	10.5/10.5.3
„Grüner" Beton	3, 4, 6	Gleitbauverfahren	10.3
Fließbeton	4	Walzbeton	12.2
selbstverdichtender Beton	4.6	Vakuumbeton	10.6
grünstandfester Beton	3, 4, 9, 10, 11	nach Bauteilen	
junger Beton	3, 4, 6	Konstruktionsbeton	3.4, 5
Festbeton	3, 5	Außenbauteilbeton	2.2, 5
wasserundurchlässiger Beton (WU)	13	Sichtbeton	10.7
flüssigkeitsdichter Beton (FD, FDE)	13	Fertigteilbeton	11.1
„säureresistenter" Beton	7.3	Straßenbeton	12
verschleißfester Beton	7.5	Massenbeton	5, 10.4
Beton mit hohem Frostwiderstand	7.1	Zementmörtel	14.1
Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand	7.1	Mauermörtel	14.2
Beton mit Meerwasser	7	Putzmörtel	14.3
feuerfester Beton	8	Auskleidungsmörtel	14.4
Recyclingbeton	16	Estrichmörtel	14.5
		Einpressmörtel	14.6

Neu- und Weiterentwicklungen konzentrieren sich zz. bevorzugt auf die Herstellungs- und Verarbeitungstechnik der Betone, wie z. B. selbstverdichtender Beton und Betonrecycling. Ebenso wird die Palette der Gebrauchseigenschaften der Festbetone in die Richtung hochdichter und hochfester Betone sowie besonders widerstandsfähiger Betone gegen äußere Angriffe erweitert.

2 Ausgangsstoffe

2.1 Zement

2.1.1 Leistungsmerkmale und Anwendungsbereiche

Der *Zement* übt einen wesentlichen Einfluss auf die von Beton und Mörtel zu erfüllenden Anforderungen aus [Wis2, Spr1]. **Tafel II.2.1-1** zeigt eine qualitative Zuordnung der *Leistungsmerkmale* der Zemente nach DIN 1164-1 (s. Tafel IV.3-20 und Abschnitte I.4 und I.5) zu den Anforderungen an Beton und Mörtel sowie die baupraktischen Nachweise dieser Leistungsmerkmale.

Durch Erst- und Überwachungsprüfungen wird nachgewiesen, dass Beton und Mörtel die geforderte Konsistenz und Festigkeit aufweisen (Performancenachweis). Dieser Nachweis wird gegebenenfalls durch Identitäts- bzw. durch Annahme- oder Kontrollprüfungen bestätigt.

Die Verarbeitungsmerkmale von Beton und Mörtel (s. Abschnitt II.4) hängen nur mittelbar von den zugehörigen Leistungsmerkmalen des Zements wie Wasseranspruch, Ansteifen, Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten ab. Dies liegt zum einen daran, dass sich die jeweils geeigneten Prüfverfahren unterscheiden. Zum anderen unterscheidet sich die Zusammensetzung des Normmörtels bei der Zementprüfung i. d. R. von der des Betons bzw. Mörtels, z. B. im w/z-Wert sowie in Art und Menge des Zuschlags. Das Gleiche gilt auch für den Zusammenhang zwischen Zementnormfestigkeit und Betonfestigkeit. Eine enge Korrelation zwischen Zementnormfestigkeit und Betondruckfestigkeit besteht dabei für Betone gleicher Zusammensetzung und gleichen w/z-Werts (s. **Bild II.2.1-1**).

Tafel II.2.1-1: Anforderungen an Beton und Mörtel und zugehörige Leistungsmerkmale der Zemente

Anforderungen an Beton und Mörtel	zugehörige Leistungsmerkmale der Zemente
Verarbeitung	
Transport	Wasseranspruch
Fördern	Ansteifen
Verdichten	Erstarren
Nachbehandeln	Erhärten
Nutzung	
Festigkeit	mechanische Leistungsmerkmale
Verformung	Erhärten
	Hydratationswärme
Dauerhaftigkeit	
Frost	physikalische Leistungsmerkmale
Carbonatisierung	Zementsteingefüge
Chlorideindringen	chem.-min. Leistungsmerkmale
chem. Angriff	Carbonatisierungswiderstand
Hydrolyse	Chloridbindung
Verschleiß	Sulfatwiderstand
	Säurewiderstand
	Raumbeständigkeit
Recyclingfähigkeit	
Umweltverträglichkeit	

[1] oder entsprechender Norm

Durch seine physikalischen und chemisch-mineralogischen Leistungsmerkmale beeinflusst der Zement die Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. Diese Leistungsmerkmale unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Zementart. Daraus

baupraktische Nachweise	
Zement Konformität mit DIN 1164-1	Beton und Mörtel Konformität mit E DIN 1045-2[1)]
	Performancenachweis (s. Abschnitte II.4 bis II.6)
Erstarren (Wasseranspruch)	Konsistenz
Festigkeit Hydratationswärme (NW-Zemente)	Festigkeit
	Preskriptiver Nachweis (s. Abschnitt II.7)
chemische Anforderungen Raumbeständigkeit Sulfatwiderstand (HS-Zemente) wirksamer Alkaligehalt (NA-Zemente)	Zusammensetzung verwendbare Zementarten
	(s. Abschnitt II.16)
	eventuell Zusatznachweise (s. Abschnitt II.18)

resultierende Einflüsse werden durch entsprechende Festlegungen in Normen und Regelwerken zur Beton- bzw. Mörtelzusammensetzung sowie zur Verwendbarkeit der genormten Zementarten unter den baupraktisch relevanten Umweltbedin-

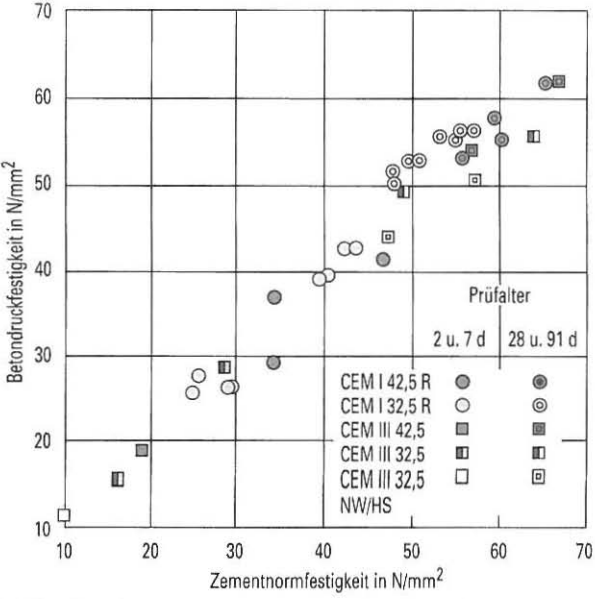


Bild II.2.1-1: Zusammenhang zwischen Zementnormfestigkeit und Betonfestigkeit (w/z = 0,50) [Han1]

gungen (s. Abschnitt II.1.1) berücksichtigt (preskriptiver Nachweis).

Durch die Normfestlegungen wird sichergestellt, dass der Mörtel und Beton ein ausreichend dichtes Gefüge im Gebrauchszustand aufweist. Ein dichtes Gefüge des Zementsteins bewirkt nicht nur eine ausreichende Festigkeit, sondern schafft auch die Voraussetzungen für eine ausreichende Dauerhaftigkeit. Entsprechend

zusammengesetzte Betone besitzen ein Zementsteingefüge, das gegen schadenauslösende Transportvorgänge von Flüssigkeiten (z. B. gefrierendes Wasser) oder von Gasen (z. B. CO_2 der Umgebungsluft) ausreichend dicht ist (s. Abschnitt I.5.7). Transportabhängige chemisch-mineralogische Veränderungen (z. B. Carbonatisierung, Eindringen von Chlorid) oder mechanische Beanspruchungen (z. B. Frostbeanspruchungen) bleiben bei Beachtung der normgemäßen Regelungen insgesamt gering, sodass zementartspezifische Unterschiede i. d. R. nicht zu berücksichtigen sind (s. auch Abschnitt II.7).

Einschränkungen bei der Verwendbarkeit der in DIN 1164 genormten Zemente müssen nur bei Bauteilen unter Frost-Tausalzeinwirkungen getroffen werden (s. Abschnitt II.7.1). **Tafel II.2.1-2** zeigt die in E DIN 1045-2 getroffenen Festlegungen zur Verwendung von Zementen nach DIN 1164 in Bauteilen unter den dort festgelegten Umweltklassen. Hervorzuheben ist, dass die Spannstahlverträglichkeit auch für hüttensandhaltige Zemente und für Portlandölschieferzemente nachgewiesen wurde. **Tafel II.2.1-3** fasst die nach E DIN 1045-2 zugelassenen Zemente für die wesentlichen Anwendungsgebiete des Betons in Deutschland zusammen.

Die Leistung der Zemente wird für den Übereinstimmungsnachweis durch Prüfung ermittelt. Die Erfüllung der Normenforderungen wird entsprechend den in DIN 1164 bzw. DIN EN 197 festgelegten Übereinstimmungskriterien nachgewiesen (s. Abschnitte I.2 und II.17). Die beim Übereinstimmungsnachweis durchzuführenden Prüfungen des Zements nach DIN EN 196 sind darauf ausgelegt, die grundsätzliche bautechnische Eignung der Zemente durch Erfüllung der in der Norm festgelegten mechanischen, physikalischen und chemisch-mineralogischen Anforderungen festzustellen. Die statistische Auswertung der Prüfergebnisse (s. Abschnitt II.17) dient dabei dem Nachweis,

Tafel II.2.1-2: Verwendbare Zemente für Umweltklassen nach E DIN 1045-2

Umweltklasse nach E DIN 1045-2		
kein Korrosions-/Angriffsrisiko		X0
Korrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung		XC1–XC4
Korrosion, verursacht durch Chloride	Meerwasser	XS1–XS3
	kein Meerwasser	XD1–XD3
Frostangriff	ohne Taumittel	XF1, XF3
	mit Taumittel, mäßige Wassersättigung	XF2
	mit Taumittel, hohe Wassersättigung	XF4
chemischer Angriff	schwach	XA1
	mäßig/stark	XA2, XA3
Verschleiß		XM1–XM3
Spannbeton mit nachträglichem und sofortigem Verbund		
Einpressmörtel für Spannglieder		

[1] Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 mit einem Hüttensandgehalt von ≤ 50 M.-%

[2] Nur für Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone und für Räumerlaufbahnen

[3] Zusätzliche Regelungen bei Sulfatangriff (s. Abschnitt II.7.3.3)

[4] zz. nach DIN 4227 mindestens der Festigkeitsklasse 32,5 R

[5] zz. nach DIN 4227 nicht verwendbar

Zement DIN 1164-1								
CEM I	CEM II						CEM III	
	S A/B	P A/B	V A	T A/B	L A	SV B	A	B
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	–	–	X	X	–	X	X
X	X	–	–	X	X	–	X[1)]	X[2)]
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X[4)]	X[4)]	X	X[5)]	X[4)]	X[4)]	X[5)]	X
X	–	–	–	–	–	–	–	–

Tafel II.2.1-3: Für unterschiedliche Betonanwendungen verwendbar Zemente nach E DIN 1045-2

Anwendungsgebiete des Betons	
unbewehrter Beton	X0
frostgeschützte Bauteile	XC1–XC4
Außenbauteile	XC, XF1, XF3
Außenbauteile unter Taumitteleinwirkung[6)]	XC, XD, XF2
	XC, XD, XF4
Wasser- und Meeresbauwerke	XS, XF2, XF4
chemischer Angriff	XA
Verkehrsflächen	XF4, XM

[1)] Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 mit einem Hüttensandgehalt von ≤ 50 M.-%

[2)] Nur für Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone und für Räumerlaufbahnen

[3)] Zusätzliche Regelungen bei Sulfatangriff (s. Abschnitt II.7.3.3)

[4)] Für Betonfahrbahndecken nach ZTV Beton-StB in Abstimmung mit dem Auftraggeb (Hochofenzement nur CEM III/A mindestens der Festigkeitsklasse 42,5)

[5)] Für Betonfahrbahndecken nach ZTV Beton-StB Gesamtalkaligehalt Na_2O-Äquivalent ≤ 1,0 M.-%

[6)] Anforderungen nach ZTV-Ing zz. noch in Diskussion

dass diese Anforderungen mit ausreichender Sicherheit erfüllt werden. Genormte und überwachte Zemente sind die Voraussetzung dafür, dass die Anforderungen an Beton und Mörtel planmäßig erfüllt werden können.

Zement DIN 1164-1								
CEM I	CEM II						CEM III	
	S A/B	P A/B	V A	T A/B	L A	SV B	A	B
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	–	–	X	X	–	X	X
X	X	–	–	X	X	–	X[1)]	X[2)]
X	X	–	–	X	X	–	X[1)]	X[2)]
X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]	X[3)]
X[5)]	X[4)5)]	–	–	X[4)5)]	X[4)5)]	–	X[4)5)]	–

Die nach E DIN 1045-2 zu beachtenden Mindestzementgehalte sind unabhängig von der verwendeten Zementart. Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 und andere entsprechend bauaufsichtlich zugelassene Flugaschen sowie bauaufsichtlich zuge-

lassene Silicastäube dürfen unabhängig von der verwendeten Zementart dem Beton als Betonzusatzstoff zugegeben werden (s. Abschnitt II.2.2). Der in E DIN 1045-2 geforderte Mindestzementgehalt darf dabei nur auf die in dieser Norm festgelegten niedrigeren Werte abgemindert werden, wenn Portlandzemente CEM I, Portlandkompositzemente CEM II/S, CEM II/T und CEM II/A-L sowie Hochofenzemente CEM III/A oder CEM III/B verwendet werden. Für Hochofenzemente CEM III/B gilt dies nur bei einem nachgewiesenen Hüttensandgehalt von bis zu 70 M.-%.

Die Regeln für die Anrechnung von Flugasche und Silicastaub auf den äquivalenten Wasserzementwert gelten unabhängig von der verwendeten Zementart. Bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche und Silicastaub als Betonzusatzstoff muss entsprechend E DIN 1045-2 die höchstzulässige Menge an Flugasche und Silicastaub in der Betonzusammensetzung bei Portlandkomposit- (CEM II) und Hochofenzementen (CEM III) stärker begrenzt werden als bei Portlandzementen (CEM I). Dabei ist eine gleichzeitige Verwendung von Flugasche und Silicastaub bei flugaschehaltigen Portlandkompositzementen (CEM II/V bzw. CEM II/SV), bei Portlandpuzzolanzementen (CEM II/P) und bei Hochofenzementen (CEM III/B) nicht zulässig (s. Abschnitt II.2.2.2).

2.1.2 Baupraktische Anwendung

Bild II.2.1-2 zeigt eine Zuordnung der in Deutschland versandten Zementmengen des Jahres 1998 zu den Zementarten und -festigkeitsklassen nach DIN 1164 (s. auch Tafel I.2.2-2). Etwa 60% der in Deutschland hergestellten Zemente gehören zur Festigkeitsklasse 32,5 R bzw. 32,5. Davon sind wiederum knapp 60% Portlandzemente CEM I und jeweils etwa 20% Portlandkompositzemente CEM II bzw. Hochofenzemente

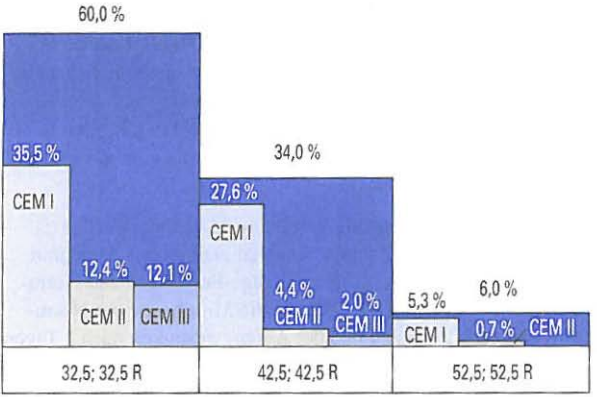


Bild II.2.1-2: Anteile der Zementarten und Zementfestigkeitsklassen am Inlandsversand der in Deutschland hergestellten Zemente (Bezugsjahr 1998)

CEM III. Die CEM I- und CEM II-Zemente gehören dabei fast ausschließlich der Festigkeitsklasse 32,5 R an, die CEM III-Zemente der Festigkeitsklasse 32,5. Etwa 34% sind Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 R bzw. 42,5 und etwa 6% der Festigkeitsklasse 52,5 R bzw. 52,5. Während bei letzteren überwiegend Portlandzemente CEM I zur Anwendung kommen, beträgt bei der Festigkeitsklasse 42,5 bzw. 42,5 R der Anteil an Portlandkompositzementen (CEM II) etwa 13% und der an Hochofenzementen (CEM III) etwa 6%.

Die Zemente der höheren Festigkeitsklassen werden überwiegend bei der Werkfertigung von Betonfertigteilen und Betonwaren verwendet. Ihr Anteil an der *Gesamtversandmenge* des Zements beträgt etwa 30%. Die Zemente der unteren Festig-

keitsklasse finden ihre überwiegende *Anwendung* im Bereich des Ortbetons, der mit 58% – davon über 80% als Transportbeton – den größten Anteil an der Gesamtversandmenge behauptet. Die restlichen rd. 12% der Gesamtversandmenge kommen als Sackware (etwa 8%) in den Markt oder gehen als Silozemente in die industrielle Weiterverarbeitung, z. B. zur Mörtelherstellung.

Die in Deutschland hergestellten Zemente gleicher Festigkeitsklasse weisen weitgehend unabhängig von der Zementart vergleichbare Anfangs- (2- bzw. 7-Tage-Festigkeit) und Normfestigkeiten auf. **Bild II.2.1-3** zeigt die Mittelwerte der Normfestigkeit nach 28 Tagen und der Anfangsfestigkeit nach 2 Tagen für die in Deutschland hergestellten Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R. Besonders festzuhalten ist dabei, dass die in Deutschland hergestellten Portlandkompositzemente (CEM II) ein den Portlandzementen vergleichbares Festigkeitsbildungsvermögen aufweisen [FIZ1]. Portlandkompositzemente (CEM II) mit latent-hydraulischen oder puzzolanischen Zementbestandteilen weisen gegenüber den Portlandzementen i. d. R. ein etwas höheres Nacherhärtungspotential, jedoch ein etwas verlangsamtes Festigkeitsbildungsvermögen in den ersten Stunden bis zum Erreichen der Anfangsfestigkeit auf (s. Abschnitte II.5 und II.9.5).

Die Wahl der zu verwendenden Zementart wird deshalb zuerst durch die Bedingungen bestimmt, unter denen Beton und Mörtel hergestellt und verarbeitet wird [Alb1]. Bei der Werkfertigung von Fertigteilen und Betonwaren wird eine schnelle Festigkeitsentwicklung während der ersten Stunden gefordert, um frühes Entformen und damit hohe Produktionsraten zu ermöglichen. Hier kommen deshalb fast ausschließlich Zemente der Festigkeitsklassen 42,5 R und 52,5 R zur Anwendung und dabei überwiegend Portlandzemente. Bei Ortbeton als Transport- bzw.

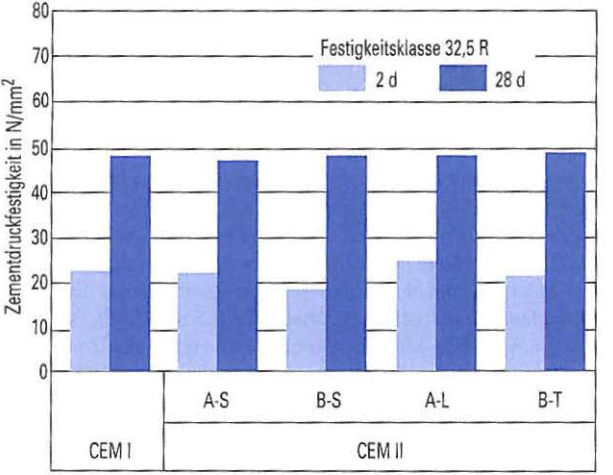


Bild II.2.1-3: Mittelwerte der Druckfestigkeiten für Zemente CEM I und CEM II der Festigkeitsklasse 32,5 R

Baustellenbeton kommen überwiegend Zemente der Festigkeitsklassen 32,5, 32,5 R und 42,5 zum Einsatz. Portlandhüttenzemente (CEM II/S) und Portlandkalksteinzemente (CEM II/A-L) mit ihrem den Portlandzementen vergleichbaren Festigkeits- und Verarbeitungsverhalten gewinnen dabei zunehmend an Bedeutung [FIZ1].

Bei besonderen Anforderungen an die Frischbetonverarbeitung und das Festbetonverhalten können von der Zementart und der Zementfestigkeitsklasse abhängige Einflüsse genutzt werden. Werden sehr frühe Ausschalfristen für Ortbetonbauteile gefordert oder muss bei niedrigen Außentemperaturen entschalt wer-

den, so eignen sich dafür die auch in der Werkfertigung bevorzugten Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit. Zur Verminderung der Hydratationswärmeentwicklung in massigen Bauteilen (s. auch Abschnitt II.5) eignen sich NW-Zemente mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung bzw. Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 mit langsamer Festigkeitsentwicklung und einem etwas längeren Nachbehandlungsbedarf (s. Abschnitt II.9.5). Zur Verringerung der Rissbildung im jungen Alter von Betonbauteilen sind Zemente gefragt, deren Festigkeits- und damit Hydratationswärmeentwicklung im jeweiligen Beton während der ersten Tage nicht über das Maß hinausgeht, das für den Bauablauf erforderlich ist (s. Abschnitte II.5 und II.10). Beim starken Angriff kalklösender Kohlensäure eignen sich Zemente mit geringerem Anteil an Portlandzementklinker, z. B. CEM III-Zemente. Bei Sulfatangriff werden schädigende Treiberscheinungen durch HS-Zemente zuverlässig vermieden (s. Abschnitte I.5.6 und II.7.3.3). Kommen alkaliempfindliche Zuschläge zum Einsatz, muss gegebenenfalls NA-Zement verwendet werden (s. Abschnitt II.7.6). Aus dem Nachweis der Recyclingfähigkeit von Frisch- und Festbeton resultieren keine zusätzlichen Anforderungen an die in Deutschland genormten Zemente (s. Abschnitt II.16).

Angaben zur Umweltverträglichkeit von Zement enthält Abschnitt I.5.9. Der Einfluss des Zements auf die Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe kann durch dessen Eignung für den Einsatz in trinkwasserberührten Bauteilen oder in Bauteilen in Kontakt mit Grundwasser und Boden dargestellt werden (s. Abschnitt II.18). Die für diese Verwendung festgelegten trinkwasser- bzw. grundwasserhygienischen Anforderungen werden von den in Deutschland genormten Zementen erfüllt. Dies ist ein Nachweis für die grundsätzliche Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe.

2.2 Betonzusatzstoffe

2.2.1 Zusatzstoffarten

Betonzusatzstoffe sind fein verteilte organische oder anorganische Stoffe, die im Beton verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um besondere Eigenschaften zu erreichen. Zu den organischen Zusatzstoffen gehören z. B. Kunststoffdispersionen (s. Abschnitt II.2.2.4). In E DIN 1045-2 wird bei den anorganischen Zusatzstoffen zwischen nahezu inerten Zusatzstoffen (Typ I) und puzzolanischen oder latenthydraulischen Zusatzstoffen (Typ II) unterschieden. Während Typ I-Zusatzstoffe nicht mit Zement und Wasser reagieren, sind Typ II-Zusatzstoffe reaktionsfähig und liefern einen gewissen Beitrag zur Betonerhärtung. In Deutschland werden als Typ II nur puzzolanische Zusatzstoffe eingesetzt.

Betonzusatzstoffe sind bei der Stoffraumrechnung als Volumenanteil des Betons zu berücksichtigen. Sie liegen in Mehlkorngröße vor und können daher auch zum Einstellen des erforderlichen Mehlkorngehalts des Betons verwendet werden. Zusatzstoffe beeinflussen durch physikalische und/oder chemische Wirkungen Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die Farbe des Betons. Bei den Frischbetoneigenschaften werden der Luftgehalt, die Konsistenz, die Verarbeitbarkeit und das Wasserrückhaltevermögen sowie ggf. das Ansteifen, Erstarren und Erhärten beeinflusst. Bei den Eigenschaften des erhärteten Betons sind es Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit. Der Einfluss auf die maßgeblichen Betoneigenschaften wird durch die Erstprüfung vor Produktionsbeginn einer neuen Betonsorte nachgewiesen.

Zusatzstoffe dürfen die Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit des Betons und den Korrosionsschutz der Bewehrung, nicht beeinträchtigen. Sie müssen gleichmäßig zusammengesetzt sein, damit z. B. bei der Erstprüfung

nachgewiesene Eigenschaften auch während der laufenden Betonherstellung für die Bauausführung vorhanden sind. Für Zusatzstoffe des Typs II, für die die Regelwerke eine Anrechnung bei der Festlegung der erforderlichen Betonzusammensetzung zulassen, werden zudem Anforderungen an die Wirksamkeit gestellt. Die Erfüllung der Anforderungen der jeweils gültigen Regelwerke an die Unschädlichkeit, Gleichmäßigkeit und Wirksamkeit ist in regelmäßigen Überwachungsprüfungen nachzuweisen (s. Abschnitt II.17). Bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke [Ri20] existieren derzeit für Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450, Trass nach DIN 51043, Gesteinsmehl aus natürlichem Gestein nach DIN 4226-1 und Pigmente nach DIN EN 12878. Zusatzstoffe, die von den technischen Regeln abweichen oder für die keine entsprechend eingeführten technischen Regeln existieren, benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Die Anforderungen an diese Zusatzstoffe werden im Zulassungsbescheid festgelegt.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen sind keine nachteiligen Einflüsse von genormten Zusatzstoffen auf die Umweltverträglichkeit des Betons zu befürchten [Hoh1]. Wenn dies bei nicht genormten Zusatzstoffen aufgrund des Herstellungs- bzw. Gewinnungsprozesses oder der spezifischen Zusammensetzung nicht ohne weiteres unterstellt werden kann, sind vor Einsatz als Zusatzstoff gesonderte Nachweise der Umweltverträglichkeit erforderlich (s. Abschnitt I.5.9).

2.2.2 Reaktive Zusatzstoffe (Typ II)

Reaktive Zusatzstoffe können nach E DIN 1045-2 puzzolanische oder latent-hydraulische Eigenschaften besitzen. Latent-hydraulische Stoffe greifen frühzeitig in den Reaktionsverlauf des Zements ein und beeinflussen maßgeblich das Ansteif-, Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Betons. Das erfordert zur

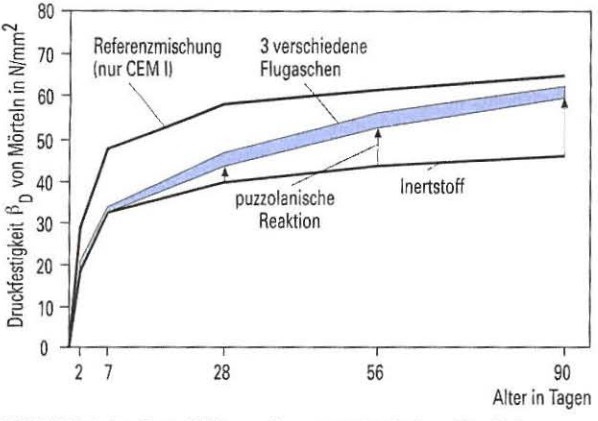


Bild II.2.2-1: Entwicklung der puzzolanischen Reaktion, dargestellt anhand des Festigkeitsverlaufs nach [Sch6]. 32 Vol.-% des Zementes (CEM I 42,5 R) wurden durch 3 verschiedene Flugaschen bzw. durch Inertstoff (Quarzmehl) ausgetauscht

Vermeidung größerer Schwankungen und Beeinträchtigungen der Betoneigenschaften eine gegenseitige Abstimmung und Optimierung der Eigenschaften des latent-hydraulischen Stoffs mit den Eigenschaften des Zements. Eine optimale Abstimmung ist dann möglich, wenn latent-hydraulische Stoffe, z. B. Hüttensand, als Hauptbestandteil von Zement eingesetzt werden, wie das in Deutschland zur Herstellung von Portlandhüttenzement (CEM II/S) bzw. Hochofenzement (CEM III) erfolgt (s. Abschnitt I.3.1.2).

Puzzolanische Zusatzstoffe erhärten nicht selbständig. Sie können nach Feuchtlagerung durch Bindung von Calciumhydroxid, z. B. aus dem Zement, festigkeitsbildende Reaktionsprodukte

liefern **(Bild II.2.2-1)**. Der Beitrag puzzolanischer Zusatzstoffe zur Festigkeitsentwicklung des Betons im jungen Alter wird ähnlich wie bei inerten Zusatzstoffen im Wesentlichen durch Verbesserung der Kornzusammensetzung und der Raumausfüllung in der Matrix des Betons bewirkt. Da Puzzolane i. d. R. langsam reagieren, ist eine gute Nachbehandlung erforderlich, weil sonst die Dauerhaftigkeit des Betons – vor allem im Oberflächenbereich – gefährdet ist. Zu den puzzolanisch reagierenden Zusatzstoffen gehören Flugasche, Silicastaub sowie natürliche Puzzolane, wie z. B. Trass.

Flugaschen

Flugaschen sind ein Verbrennungsrückstand aus Kohlekraftwerken. Sie können sowohl bei der Zementherstellung als Rohstoffkomponente (s. Abschnitt I.3.1.1) oder als Hauptbestandteil des Zementes (s. Abschnitt I.3.1.2) als auch als Betonzusatzstoff eingesetzt werden. Flugaschen, die bei der Verfeuerung von feingemahlener Steinkohle anfallen, werden in Deutschland in einer Menge von etwa 3 Mio. Jahrestonnen überwiegend als Betonzusatzstoff eingesetzt [Sch6, Syb1]. Seit 1995 gibt es eine europäische Norm DIN EN 450, die die Anforderungen an Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff festlegt. Flugaschen, die bei der Verfeuerung von Braunkohle anfallen, werden durch DIN EN 450 derzeit nicht erfasst. Sie benötigen eine bauaufsichtliche Zulassung als Zusatzstoff. Zuvor muss in Zulassungsversuchen ihre grundsätzliche Eignung nachgewiesen werden. So kommen die meisten Braunkohlenflugaschen aufgrund ihres Sulfat- und Freikalkgehalts sowie ihrer geringen Gleichmäßigkeit für eine Anwendung als Betonzusatzstoff nicht in Frage. Werden bei der Verfeuerung der Steinkohle geringe Mengen an anderen Brennstoffen mitverbrannt, so ist nachzuweisen, dass die Betoneigenschaften nicht ungünstig beeinflusst werden.

Hierzu sind auch ggf. Untersuchungen der Umweltverträglichkeit [Hoh1] (s. Abschnitt I.5.9) einzubeziehen. Nach entsprechenden Untersuchungen wurde die Mitverfeuerung von bis zu 5 M.-% kommunalen Klärschlamms und bis zu 10 M.-% Hartbraunkohle erlaubt [Ri20].

Die Eigenschaften von Flugaschen sind in Abschnitt I.3.1.2 beschrieben. Die Dichte liegt zwischen 2,2 bis 2,5 kg/dm^3. Die Wirkung von Flugasche auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften hängt maßgebend von ihrer Feinheit ab [Syb1]. Aus diesem Grund wird in DIN EN 450 ein Kornanteil ≤ 45 µm von mindestens 60 M.-% gefordert sowie dessen zulässige Schwankungsbreite festgelegt. Günstig ist ein hoher Anteil der Kornfraktion ≤ 10 µm. Der Einfluss von Flugasche auf die Frischbetonkonsistenz hängt außerdem von der Kornform der einzelnen Flugaschepartikel ab. Je nach Entstehungsbedingungen kann der Anteil an kugelförmig aufgeschmolzenen Partikeln deutlich variieren [Ric1, Syb1]. Dieser Einfluss kann durch Bestimmung des Wasseranspruchs an einem Leim aus Flugasche und Wasser jedoch ohne Zement abgeschätzt werden. Der Glühverlust, der den Gehalt an unverbrannten, porösen Kohlenstoffpartikeln kennzeichnet, ist auf 5,0 M.-% begrenzt, um eine Beeinträchtigung des Wasseranspruchs, des Frostwiderstands und der Wirkung von Zusatzmitteln zu vermeiden. Weiterhin dürfen Freikalk-, Sulfat- und Chloridgehalte bestimmte Werte nicht überschreiten. Flugaschen können sich abhängig von der Herkunft der verwendeten Kohlen und dem Glühverlust mehr oder weniger deutlich voneinander unterscheiden. Die ist bei der Herstellung von Sichtbeton zu beachten.

Außer von den genannten Eigenschaften hängt der Einfluss von Flugasche auf die Frischbetonverarbeitbarkeit von der jeweiligen Betonzusammensetzung ab [Kre1, Kre2]. Mit zunehmenden Feinstoffgehalten der Mischungen wird eine ggf. vorhandene

verflüssigende Wirkung der Flugasche abgeschwächt. Das Ansteifen im Beton und Mörtel wird nur unwesentlich beeinflusst.

Bei der Beurteilung der Wirkung von Flugaschen im Festbeton steht die Druckfestigkeit als einfach zu bestimmende Kenngröße zunächst im Vordergrund. Bedingt durch die langsame puzzolanische Reaktion liefert Flugasche über die reine Füllerwirkung hinaus erst spät einen Festigkeitsbeitrag (s. Bild II.2.2-1). Eine Mindestwirksamkeit der Flugasche wird im Rahmen der Überwachung durch Prüfung des Aktivitätsindex nach 28 und 90 Tagen nachgewiesen. Der erzielbare Festigkeitsbeitrag hängt außer von den Flugascheeigenschaften von der jeweiligen Mischungszusammensetzung (Flugaschegehalt, Zementart, w/z-Wert etc.) und den Nachbehandlungsbedingungen ab.

Die Wirkung von puzzolanischen Zusatzstoffen darf jedoch nicht nur aufgrund ihres Beitrags zur Druckfestigkeit beurteilt werden. Durch die puzzolanische Reaktion können sich die gebildeten Hydratationsprodukte und die Porenstruktur des Zementsteins verändern, was sich sowohl günstig als auch ungünstig auf die verschiedenen Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons auswirken kann (s. auch Abschnitt II.7) [Sch6, Här1]. Insbesondere bei Betonen für Außenbauteile ist sicherzustellen, dass die Dauerhaftigkeit bei gleicher Festigkeit nicht ungünstig beeinflusst wird **(Bild II.2.2-2)**. Durch die Festlegung von Grenzwerten für die Betonzusammensetzung in E DIN 1045-2 wird dem Rechnung getragen.

Die Wirkung von reaktiven Zusatzstoffen in Beton nach E DIN 1045-2 wird pauschal durch einen so genannten *k-Wert* berücksichtigt.

Aufgrund von vorliegenden Untersuchungsergebnissen wurde der k-Wert von Flugasche nach DIN EN 450 zu 0,4 und der

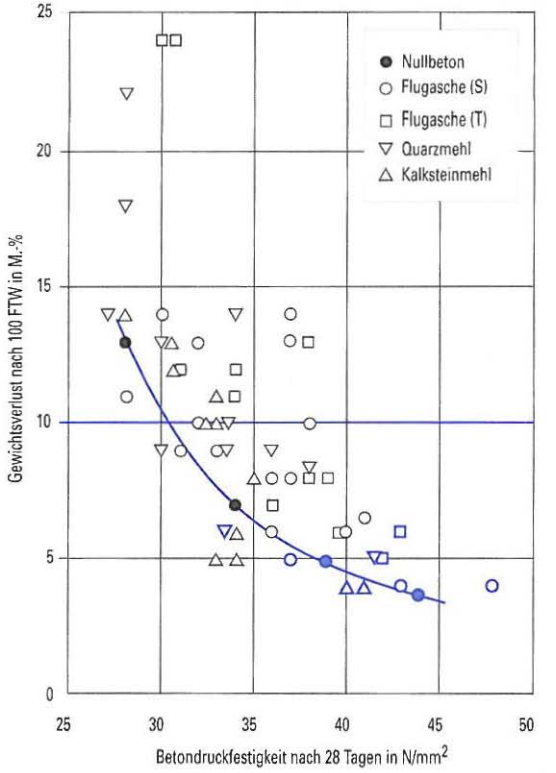


Bild II.2.2-2: Gegenüberstellung von Frostwiderstand und 28-Tage-Druckfestigkeit [Kre1, Kre2]. Betone, die hinsichtlich ihrer Zusammensetzung die Anforderungen an Umweltklasse XF1 nach E DIN 1045-2 erfüllen, sind blau gekennzeichnet.

von Silicastaub zu 1,0 festgelegt. Das bedeutet, dass gemäß E DIN 1045-2 statt des w/z-Werts der äquivalente w/z-Wert

$$w/z\,(eq) = \frac{w}{z + 0{,}4 \cdot f + 1{,}0 \cdot s} \qquad \text{[Gl.II.2.2-1]}$$

beim Nachweis des maximal zulässigen w/z-Werts zugrunde gelegt werden kann. Die anrechenbaren Höchstmengen von Flugasche f und Silicastaub s sind auf $f/z \leq 0{,}33$ bzw. $s/z \leq 0{,}11$ begrenzt. Gleichzeitig darf ein Teil der Zusatzstoffmenge auf den Bindemittelgehalt angerechnet werden, wobei nach wie vor bei Innenbauteilbeton ein Mindestzementgehalt von 240 kg/m³ und bei Außenbauteilbeton ein Mindestzementgehalt von 270 kg/m³ nicht unterschritten werden darf (s. Tafel IV.3-18). Bei Betonen, die einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt sind, ist keine *Anrechnung* zulässig. Die Anrechnungsregeln nach E DIN 1045-2 gelten unabhängig von dem verwendeten Zement. Eine Ausnahme bilden Puzzolanzemente, flugaschehaltige Zemente sowie Hochofenzemente, wenn der Hüttensandgehalt über 70 M.-% liegt. Bei Verwendung dieser Zemente darf der Zusatzstoff nicht auf den Mindestzementgehalt angerechnet werden. Flugaschen und Silicastaub dürfen auch bei Spannbeton mit nachträglichem und sofortigem Verbund eingesetzt werden.

Silicastaub

Silicastaub (auch Mikrosilica genannt) fällt als Nebenprodukt bei der Herstellung von Silicium und Siliciumlegierungen an. Zur Gewinnung von metallischem Silicium wird Quarz in Elektroöfen zusammen mit Kohle aufgeschmolzen. Der entstehende SiO-Dampf kondensiert beim Abkühlen zu amorphem SiO_2 und wird in Gewebe- oder Elektrofiltern abgeschieden. Die in Deutschland in zementgebundenen Baustoffen eingesetzte

schen Matrix und Zuschlag bzw. Fasern verbessert. Bei Verwendung von Silicastaub lassen sich sehr hohe Betonfestigkeiten und sehr dichte Betone erzielen. Wegen der hohen Materialkosten wird Silicastaub dabei bevorzugt für Spezialanwendungen, wie Faserbeton, hochfesten Beton, Beton mit hohem Widerstand gegen schädigende Einwirkungen oder Spritzbeton, eingesetzt.

Bedingt durch die starke puzzolanische Reaktion kann bei hohen Silicastaubzugaben die Alkalität der Porenlösung und das für den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderliche Alkalitätsdepot unzulässig abgesenkt werden [Man1]. Die Zugabemenge von Silicastaub ist daher auf 11 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, begrenzt. Aus dem gleichen Grund sind in E DIN 1045-2 bei gemeinsamer Verwendung von Flugasche und Silicastaub ebenfalls maximal zulässige Zugabemengen für beide Zusatzstoffe von $f/z \leq (0{,}22 - s/z) \times 3$ bei Verwendung von CEM I sowie $f/z \leq (0{,}15 - s/z) \times 3$ bei CEM II- und CEM III/A-Zementen festgelegt. Bei Betonen mit puzzolan- oder flugaschehaltigen CEM II-Zementen bzw. mit CEM III/B-Zementen ist eine gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silicastaub nicht zulässig.

Natürliche Puzzolane

Als Zusatzstoff einsetzbar sind auch natürliche *Puzzolane*, die durch Abbau und Aufbereitung von Gesteinen geeigneter mineralogischer Zusammensetzung gewonnen werden. Hierzu zählt *Trass* nach DIN 51043 (Dichte 2,4 bis 2,6 kg/dm^3), der jedoch vorwiegend als Hauptbestandteil von Zement eingesetzt wird (s. Abschnitt I.3.1.2). Die Aufbereitung kann auch eine thermische Aktivierung des Gesteins durch Tempern, wie z. B. bei Phonolit, einschließen. Nicht durch die Normen abgedeckte Puzzolane benötigen eine bauaufsichtliche Zulassung; für getemperte Gesteinsmehle existiert eine entsprechende Zulassungsrichtlinie [Ri21].

Menge betrug 1993 rd. 30 000 t, wobei der größte Teil importiert wurde [Alf1]. Nach EN 197-1 kann Silicastaub zukünftig auch als Zementbestandteil zur Anwendung kommen (s. Abschnitt I.3.1.2).

Die Silicastaub-Partikel haben eine runde Kornform. Die Korngröße liegt bei etwa 0,1 µm und ist damit im Mittel um etwa den Faktor 100 feiner als die von Zement oder Flugasche. Nach den bis zur Fertigstellung einer europäischen Norm EN 13263 geltenden Zulassungsrichtlinien [Ri21] muss die spezifische Oberfläche des Pulvers, bestimmt nach dem BET-Verfahren, zwischen 180 000 und 250 000 cm^2/g liegen. Silicastaub muss mindestens 85 M.-% SiO_2 enthalten. Zur Sicherstellung der Unschädlichkeit im Beton sind die Gehalte an elementarem Silicium, Sulfat und Chlorid sowie der Glühverlust begrenzt.

Silicastaub hat eine Dichte von rd. 2,2 bis 2,4 kg/dm^3 und im Ausgangszustand eine Schüttdichte von nur 0,20 bis 0,35 kg/dm^3. Zur Verbesserung der Handhabung wird er meistens als wässrige Aufschlämmung (Slurry) mit einem Feststoffgehalt von rd. 50 M.-% oder in kompaktierter Form (Schüttdichte rd. 0,50 bis 0,65 kg/dm^3) eingesetzt. Bei kompaktiertem Silicastaub ist auf eine ausreichende Dispergierung der gebildeten Agglomerate im Beton zu achten.

Silicastaub erhöht den Wasseranspruch, was im Allgemeinen durch Fließmittel- oder Verflüssigerzugabe ausgeglichen wird. Gleichzeitig wird der Frischbeton „klebriger" und weist ein höheres Zusammenhaltevermögen auf. Für ein optimales Mischergebnis ist eine höhere Mischenergie und eine bestimmte Mischfolge von Bedeutung [Kön1].

Bedingt durch die hohe Feinheit ist sowohl die Hohlraum füllende Wirkung als auch die puzzolanische Wirkung von Silicastaub stark ausgeprägt. Auch wird der Verbund in der Kontaktzone zwi-

Menge betrug 1993 rd. 30 000 t, wobei der größte Teil importiert wurde [Alf1]. Nach EN 197-1 kann Silicastaub zukünftig auch als Zementbestandteil zur Anwendung kommen (s. Abschnitt I.3.1.2).

Die Silicastaub-Partikel haben eine runde Kornform. Die Korngröße liegt bei etwa 0,1 µm und ist damit im Mittel um etwa den Faktor 100 feiner als die von Zement oder Flugasche. Nach den bis zur Fertigstellung einer europäischen Norm EN 13263 geltenden Zulassungsrichtlinien [Ri21] muss die spezifische Oberfläche des Pulvers, bestimmt nach dem BET-Verfahren, zwischen 180 000 und 250 000 cm^2/g liegen. Silicastaub muss mindestens 85 M.-% SiO_2 enthalten. Zur Sicherstellung der Unschädlichkeit im Beton sind die Gehalte an elementarem Silicium, Sulfat und Chlorid sowie der Glühverlust begrenzt.

Silicastaub hat eine Dichte von rd. 2,2 bis 2,4 kg/dm^3 und im Ausgangszustand eine Schüttdichte von nur 0,20 bis 0,35 kg/dm^3. Zur Verbesserung der Handhabung wird er meistens als wässrige Aufschlämmung (Slurry) mit einem Feststoffgehalt von rd. 50 M.-% oder in kompaktierter Form (Schüttdichte rd. 0,50 bis 0,65 kg/dm^3) eingesetzt. Bei kompaktiertem Silicastaub ist auf eine ausreichende Dispergierung der gebildeten Agglomerate im Beton zu achten.

Silicastaub erhöht den Wasseranspruch, was im Allgemeinen durch Fließmittel- oder Verflüssigerzugabe ausgeglichen wird. Gleichzeitig wird der Frischbeton „klebriger" und weist ein höheres Zusammenhaltevermögen auf. Für ein optimales Mischergebnis ist eine höhere Mischenergie und eine bestimmte Mischfolge von Bedeutung [Kön1].

Bedingt durch die hohe Feinheit ist sowohl die Hohlraum füllende Wirkung als auch die puzzolanische Wirkung von Silicastaub stark ausgeprägt. Auch wird der Verbund in der Kontaktzone zwi-

schen Matrix und Zuschlag bzw. Fasern verbessert. Bei Verwendung von Silicastaub lassen sich sehr hohe Betonfestigkeiten und sehr dichte Betone erzielen. Wegen der hohen Materialkosten wird Silicastaub dabei bevorzugt für Spezialanwendungen, wie Faserbeton, hochfesten Beton, Beton mit hohem Widerstand gegen schädigende Einwirkungen oder Spritzbeton, eingesetzt.

Bedingt durch die starke puzzolanische Reaktion kann bei hohen Silicastaubzugaben die Alkalität der Porenlösung und das für den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderliche Alkalitätsdepot unzulässig abgesenkt werden [Man1]. Die Zugabemenge von Silicastaub ist daher auf 11 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, begrenzt. Aus dem gleichen Grund sind in E DIN 1045-2 bei gemeinsamer Verwendung von Flugasche und Silicastaub ebenfalls maximal zulässige Zugabemengen für beide Zusatzstoffe von $f/z \leq (0{,}22 - s/z) \times 3$ bei Verwendung von CEM I sowie $f/z \leq (0{,}15 - s/z) \times 3$ bei CEM II- und CEM III/A-Zementen festgelegt. Bei Betonen mit puzzolan- oder flugaschehaltigen CEM II-Zementen bzw. mit CEM III/B-Zementen ist eine gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silicastaub nicht zulässig.

Natürliche Puzzolane

Als Zusatzstoff einsetzbar sind auch natürliche *Puzzolane*, die durch Abbau und Aufbereitung von Gesteinen geeigneter mineralogischer Zusammensetzung gewonnen werden. Hierzu zählt *Trass* nach DIN 51043 (Dichte 2,4 bis 2,6 kg/dm^3), der jedoch vorwiegend als Hauptbestandteil von Zement eingesetzt wird (s. Abschnitt I.3.1.2). Die Aufbereitung kann auch eine thermische Aktivierung des Gesteins durch Tempern, wie z. B. bei Phonolit, einschließen. Nicht durch die Normen abgedeckte Puzzolane benötigen eine bauaufsichtliche Zulassung; für getemperte Gesteinsmehle existiert eine entsprechende Zulassungsrichtlinie [Ri21].

2.2.3 Inerte Zusatzstoffe (Typ I)

Gesteinsmehle

Inerte, anorganische Zusatzstoffe reagieren unter normalen Bedingungen nicht mit Zement und Wasser. Zu ihnen gehören feingemahlene *Gesteinsmehle* wie Kalkstein- oder Quarzmehl. Diese dürfen verwendet werden, wenn sie die Anforderungen der Zuschlagnorm DIN 4226-1 erfüllen und einer entsprechenden Überwachung unterliegen. Gesteinsmehle werden dem Beton ggf. bei feinstoffarmen Mischungen zur Verbesserung der Kornabstufung und der Raumausfüllung in der Matrix zugegeben. Sie beteiligen sich praktisch nicht an Ansteifungs-, Erstarrungs- und Erhärtungsvorgängen. Ihr Festigkeitsbeitrag infolge der physikalischen Füllerwirkung ist im Vergleich zum Festigkeitsbeitrag reaktiver Zusatzstoffe gering und besitzt kaum baupraktische Bedeutung [Res1].

Pigmente

Pigmente zum Einfärben von Beton sind ebenfalls Zusatzstoffe nach DIN 1045. Sie müssen unter den stark alkalischen Bedingungen des Zementsteins beständig und wasserunlöslich sein, dürfen die betontechnischen Eigenschaften nicht nachteilig beeinflussen, müssen licht- und wetterstabil und ggf. bei größeren thermischen Belastungen auch hitzestabil sein und höchste Konstanz in Farbton und Farbstärke aufweisen. Die teilweise verwendeten organischen Pigmente erfüllen diese Bedingungen meist nicht. Daher kommen überwiegend Pigmente aus Metalloxiden (s. **Tafel II.2.2-1**) sowie zur Schwarzeinfärbung auch Kohlenstoffpigmente zur Anwendung. Ausgehend von den Grundfarben können Farbabstufungen durch Mischen unterschiedlich großer Anteile der Grundpigmente erzielt werden. Zur Einfärbung von Baustoffen werden zu 60% Eisenoxidpigmente,

Tafel II.2.2-1: Die wichtigsten Oxidpigmente [Teb1]

Farbe	chemische Formel	chemische Bezeichnung	Trivialname
Rot	α-Fe_2O_3	Eisen(III)oxid	Eisenoxidrot
Gelb	α-FeOOH	Eisen(III)oxidhydroxid	Eisenoxidgelb
Grün	α-Cr_2O_3	Chrom(III)oxid	Chromoxidgrün
Blau	$CoAl_2O_3$	Cobaltaluminat	Cobaltblau
Braun	Mischung aus	α-FeOOH und/oder α-Fe_2O_3 mit Fe_3O_4	Eisenoxidbraun
Schwarz	Fe_3O_4	Eisen(II, III)oxid	Eisenoxidschwarz
Weiß	TiO_2	Titan(IV)oxid	Titandioxid

zu 29% Chromoxidpigmente und zu 4% Mischphasen verwendet [Teb1]. Pigmente sind deutlich feiner als Zement. Wegen möglicher Probleme bei der Pigmentdosierung werden Pigmente nicht nur pulverförmig, sondern auch als wässrige Pigmentpräparation (Slurry) oder Pigmentgranulate, die sich beim Mischen des Betons auflösen, geliefert.

Die Anforderungen an Pigmente werden inzwischen durch eine europäische Norm DIN EN 12878 (früher DIN V 53237) festgelegt. Für jedes Einzelpigment muss eine Grundprüfung unter Einschaltung einer bauaufsichtlich anerkannten Stelle durchgeführt werden. Hierbei wird überprüft, ob das Pigment keine schädlichen Bestandteile enthält und das Erstarren und die Festigkeitsentwicklung nicht nachteilig beeinflusst. Bei Einsatz in unbewehrtem Beton sind bis zu 5 M.-% wasserlösliche Anteile, bei Einsatz in bewehrtem Beton bis zu 0,5 M.-% wasserlösliche Anteile und 0,10 M.-% Halogenide zulässig. Für jedes Pigment

in Lieferform muss der Hersteller die relative Farbstärke nachweisen. Bei Bedarf können auch Prüfungen der Alkali-, Wetter- und Hitzebeständigkeit durchgeführt werden.

Die Pigmentwirkung kann zuverlässig nur am ausgetrockneten Beton beurteilt werden. Mit zunehmender Pigmentzugabe steigt die Farbintensität zunächst linear. Bei etwa 5 bis 6 M.-% Zugabe, bezogen auf die Zementmenge, ist eine weitgehende Sättigung erreicht, weitere Pigmentzugaben verändern die Farbwirkung kaum. Die Zugabemenge sollte unbedingt auf das notwendige Maß beschränkt bleiben, da ein Übermaß an Pigmenten den Wasseranspruch erhöht und sich auf bestimmte Betoneigenschaften nachteilig auswirken kann. Die üblichen Dosierungen von Pigmenten liegen bei etwa 3 bis 5 M.-%. Wichtig ist die gleichmäßige Pigmentzugabe zur Vermeidung von Farbschwankungen. Die Farbwirkung hängt auch von der Betonzusammensetzung ab. Die Farbe des Zements spielt bei dunklen Pigmenten kaum eine Rolle. Bei hellen Farbtönen ist ein heller Zement besser. Besonders reine und leuchtende Farben werden bei Verwendung von Weißzement erzielt. Bei niedrigen w/z-Werten ist der Farbeffekt größer.

Pigmente sind physiologisch unbedenklich. In toxikologischen Tests zeigten sie aufgrund ihrer praktischen Unlöslichkeit weder gesundheitsschädigende Wirkungen, noch erwiesen sie sich in irgendeiner Form für den Menschen als nachteilig [Hoh1].

2.2.4 Organische Zusatzstoffe

Betonzusatzstoffe mit organischen Bestandteilen dürfen zur Betonherstellung nur verwendet werden, wenn ihre betontechnologische Eignung in Zulassungsversuchen nachgewiesen und eine bauaufsichtliche Zulassung erteilt wurde. Entsprechende Zulassungen existieren bislang nur für *Kunststoffdispersionen*,

d. h. Systeme von fein verteilten, etwa 0,1 bis 0,2 µm großen Kunststoffpartikeln in Wasser [Sch7, Sch8]. Als Polymere werden Styrolbutadiene oder Styrolacrylate verwendet. Die zur Stabilisierung enthaltenen Emulgatoren können eine starke Luftporenbildung bewirken. Um dies zu verhindern, werden Entschäumer zugegeben. Die Wirkung von Kunststoffdispersionen in Zementmörteln, z. B. für Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen, beruht auf einem „Verkleben" der einzelnen Kunststoffteilchen zu einem räumlich vernetzten Film. Dies setzt allerdings voraus, dass die Mörtel vorher genügend austrocknen konnten.

Die zulässige Zusatzmenge von Kunststoffdispersionen beträgt bis zu 20 M.-%, bezogen auf den Zement. Bei der Festlegung des w/z-Werts sollte die Kunststoffdispersion vollständig, d. h. auch der enthaltene Kunststoffanteil, dem Wassergehalt zugerechnet werden. Unter dieser Voraussetzung können das Walz-Diagramm (s. Bild II.3.3-2) und die Bemessungsansätze von E DIN 1045-1 hinsichtlich des Verformungsverhaltens (E-Modul, Schwinden, Kriechen) bei normalen Betonen in guter Näherung angewandt werden. Bei gleicher Druckfestigkeit ist mit einer höheren Zugfestigkeit und Zugbruchdehnung und geringerer Nachbehandlungsempfindlichkeit zu rechnen. Außerdem tritt mit zunehmender Zusatzmenge eine Verflüssigung der Betone bei gleichzeitig gutem Zusammenhaltevermögen ein. Weiterhin verringern Kunststoffdispersionen das Eindringen von organischen Flüssigkeiten durch Füllen der Kapillarporen sowie ggf. eine Quellwirkung. Diese Wirkung des Kunststoffs nutzt man bei Betonen für Auffangwannen als Abdichtung gegen umweltgefährdende Flüssigkeiten (s. Abschnitt II.13). Darüber hinaus haben Kunststoffdispersionen bei Konstruktionsbetonen bisher wenig Verbreitung gefunden.

2.3 Zugabewasser

Das *Zugabewasser* ist die *Wasser*menge, die dem Beton nach E DIN 1045-2 beim Mischvorgang mit einer Genauigkeit von ±3 M.-% der abzumessenden Wassermenge zugegeben wird. Als Wassergehalt wird die Summe aus Zugabewasser und Oberflächenfeuchte des Zuschlags bezeichnet. Der *Gesamtwassergehalt* im Beton ergibt sich aus dem Zugabewasser, der Oberflächenfeuchte sowie der Kernfeuchte der Zuschläge. Letztere wirkt sich nicht auf die Konsistenz und den Wasserzementwert aus. Werden Zusatzmittel oder Zusatzstoffe als Suspensionen eingesetzt, ist i. d. R. der enthaltene Wasseranteil dem Zugabewasser zuzurechnen (s. Abschnitt II.2.4.2).

Grundsätzlich ist *Trinkwasser* sowie im Allgemeinen das in der Natur vorkommende Wasser als Zugabewasser zur Herstellung von Beton geeignet, so weit es nicht Bestandteile enthält, die das Erhärten, andere Eigenschaften des Betons oder den Korrosionsschutz der Bewehrung ungünstig beeinflussen. Für die Prüfung und Beurteilung von Wasser unbekannter Zusammensetzung und Wirkung als Zugabewasser für Beton wurde vom Deutschen Beton-Verein ein Merkblatt erarbeitet [Me26].

Die Wiederverwendung von *Restwasser* aus dem Frischbetonrecycling als Zugabewasser für Beton entsprechend dem DBV-Merkblatt ist in der „Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [Ri5] geregelt und in nahezu allen Transportbetonwerken Stand der Technik (s. Abschnitt II.16.1).

Der europäische Entwurf prEN 1008 „Zugabewasser für Beton" enthält Festlegungen für die Probenahme, die Prüfung und Beurteilung von Wasser und Restwasser aus dem Frischbetonrecycling.

2.4 Betonzusatzmittel

2.4.1 Übersicht

Betonzusatzmittel sind Zusätze zum Beton, die durch chemische und/oder physikalische Wirkungen die Eigenschaften von Beton beeinflussen. Je nach Art des eingesetzten Betonzusatzmittels können sowohl die Eigenschaften des Frischbetons, z. B. das Erstarrungsverhalten und die Verarbeitbarkeit, als auch die des erhärteten Betons, wie z. B. die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit, gezielt verändert werden. Die heutige Betontechnologie ist in starkem Maß auf den Einsatz von Betonzusatzmitteln ausgerichtet. So sind zahlreiche Betoneigenschaften ohne Betonzusatzmittel nicht zu erzielen, und viele Bauaufgaben lassen sich nur durch den Einsatz von Zusatzmitteln bewältigen. Dementsprechend werden in der Bundesrepublik Deutschland derzeit bei 80 bis 90% aller industriell hergestellten Betone Zusatzmittel verwendet [Spa1].

2.4.2 Normen und Definitionen

Nach E DIN 1045-2 sind Betonzusatzmittel Betonzusätze, die verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften des Betons günstig zu beeinflussen. Da sie jedoch zugleich andere Eigenschaften nachteilig verändern können, ist beim Einsatz von Betonzusatzmitteln stets eine Erstprüfung für den herzustellenden Beton erforderlich. Dabei kann es – z. B. bei wechselnden Umgebungstemperaturen – notwendig sein, die Erstprüfungen auch unter den jeweiligen Baustellenbedingungen durchzuführen.

Betonzusatzmittel werden nur in geringen Mengen eingesetzt. Deshalb sind sie als Volumenanteil des Betons ohne Bedeutung. In **Tafel II.2.4-1** sind die Mindest- und Höchstwerte der zulässigen *Zugabemengen* von Betonzusatzmitteln für verschiedene Anwendungsbereiche zusammengefasst.

Tafel II.2.4-1: Grenzwerte für die zulässigen Zusatzmittelzugabemengen

Anwendungsbereich	zulässige Zusatzmenge in ml (cm^3) oder g Betonzusatzmittel je kg Zement		
	Mindestwert allgemein	Mindestwert für Fließmittel	Höchstwert
I) Beton, Stahlbeton und Spannbeton	2	4	50
II) Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag nach [Ri13]	2	4	20
III) hochfester Beton nach [Ri6]	2	4	70

Bei der Anwendung mehrerer Betonzusatzmittel darf die insgesamt zugegebene Menge für die Anwendungsbereiche I und III (s. Tafel II.2.4-1) um 10 ml bzw. 10 g/kg Zement erhöht werden. Hierbei dürfen – außer bei Fließmitteln – nicht mehrere Betonzusatzmittel derselben Wirkungsgruppe verwendet werden.

Die E DIN 1045-2 sieht vor, dass sich die Höchstwerte der zulässigen Zugabemengen für den Anwendungsbereich I auf den Zement, zuzüglich anrechenbarer Anteile von Zusatzstoffen, beziehen. Außerdem können Zusatzmittelmengen unter 2 g/kg Zement eingesetzt werden, wenn sie in einem Teil des Zugabewassers aufgelöst werden. Flüssige Zusatzmittel werden nicht mehr vollständig auf den Wasserzementwert angerechnet, sondern nur der in dem Zusatzmittel enthaltene Wasseranteil. Dies ist ab einer Gesamtmenge an Zusatzmitteln von größer als 3 l/m^3

Beton erforderlich. Zurzeit gilt noch, dass Zusatzmittel ab einer Menge von 2,5 l/m³ Beton insgesamt dem Zugabewasser zugerechnet werden. Bei der Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton mit Fließmitteln muss stets die gesamte Fließmittelmenge berücksichtigt werden [Ri48].

Nach E DIN 1045-2 dürfen für Beton und Zementmörtel nur Betonzusatzmittel mit gültigem Prüfzeichen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) und nur unter den im Prüfbescheid angegebenen Bedingungen verwendet werden. Für die Erlangung eines Prüfzeichens müssen die betreffenden Zusatzmittel den in den „Richtlinien für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel *(Zulassungsrichtlinien)*" [Ri23] gestellten Anforderungen genügen. Die Zulassungsrichtlinien enthalten unter anderem Grundanforderungen hinsichtlich der Gleichmäßigkeit, Unschädlichkeit, Verträglichkeit und Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln sowie die dazu gehörenden Prüfverfahren. Darüber hinaus muss für Betonzusatzmittel entsprechend den „Richtlinien für die Überwachung von Betonzusatzmitteln" *(Überwachungsrichtlinien)*" [Ri24] des DIBt eine werkseigene Produktionskontrolle und Fremdüberwachung einschließlich Produktprüfung durchgeführt werden.

Hinsichtlich der beabsichtigten Wirkung auf die Betoneigenschaften werden Betonzusatzmittel nach den Zulassungsrichtlinien in zehn Wirkungsgruppen eingeteilt. In **Tafel II.2.4-2** sind die verschiedenen Wirkungsgruppen sowie die dafür festgelegten Kurzzeichen und Kennfarben aufgelistet. Betonzusatzmittel einer Wirkungsgruppe können zusätzlich Nebenwirkungen anderer Wirkungsgruppen aufweisen. Die Zulassung wird jedoch grundsätzlich nur für die beantragte Wirkungsgruppe erteilt.

Bei der Zulassung ist der Nachweis, dass die Zusatzmittel mit dem Zement und Beton verträglich sind und keine Stoffe enthalten, die den *Korrosionsschutz der Bewehrung* im Beton beein-

Tafel II.2.4-2: Wirkungsgruppen der Betonzusatzmittel

Wirkungsgruppe	Kurzzeichen	Farbkennzeichnung
Betonverflüssiger	(BV)	Gelb
Fließmittel	(FM)	Grau
Luftporenbildner	(LP)	Blau
Dichtungsmittel	(DM)	Braun
Verzögerer	(VZ)	Rot
Beschleuniger	(BE)	Grün
Einpresshilfen	(EH)	Weiß
Stabilisierer	(ST)	Violett
Chromatreduzierer	(CR)	Rosa
Recyclinghilfen für Waschwasser	(RH)	Schwarz

trächtigen, von besonderer Bedeutung. So darf der Halogengehalt (außer Fluor) von Betonzusatzmitteln, ausgedrückt als Chlorid, allgemein 0,2 M.-%, bei Einpresshilfen 0,1 M.-%, nicht überschreiten. Weiterhin dürfen Betonzusatzmitteln für Beton nach E DIN 1045-2 keine Chloride, Thiocyanate, Nitrite oder Nitrate, bei der Anwendung für Spannbeton auch keine Formiate, zugegeben werden.

Für Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag ist auch der Alkaligehalt beschränkt. Allgemein darf die mit dem Zusatzmittel in den Beton eingebrachte Alkalimenge, ausgedrückt als Na_2O-Äquivalent, 0,02 M.-%, bezogen auf die Zementmenge, nicht überschreiten. Wenn nur ein Zusatzmittel eingesetzt wird, darf

der Alkaligehalt des Betonzusatzmittels nach [Ri13] bis zu 8,5 M.-% (Na_2O-Äquivalent) betragen.

Die höchste, für die Anwendung vorgesehene Betonzusatzmittelmenge wird im Prüfbescheid als zulässige Zusatzmenge bei flüssigen Mitteln in ml, bei Pulvern und Granulaten in g je kg Zement angegeben. Die zulässige Zusatzmenge muss innerhalb der in **Tafel II.2.4-1** angegebenen Grenzen liegen. Dabei können für die verschiedenen Anwendungsbereiche unterschiedliche Zusatzmengen genehmigt werden. Die Eignung der Zusatzmittel für die Anwendungsbereiche Spannbeton, Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag und hochfester Beton ist im Prüfbescheid vermerkt.

Die vorliegende europäische Norm für Betonzusatzmittel DIN EN 934-2 umfasst neun Zusatzmittelarten. Diese entsprechen in vielen Fällen den Zusatzmitteln der **Tafel II.2.4-2**. Allerdings sind in der europäischen Betonzusatzmittelnorm Einpresshilfen, Spritzbetonbeschleuniger, Chromatreduzierer und Recyclinghilfen für Waschwasser nicht enthalten. Dafür differenziert DIN EN 934-2 zwischen Beschleunigern, die das Erstarren und jenen, die das Erhärten beschleunigen. Außerdem enthält die Norm multifunktionale Zusatzmittel, die mehr als eine Hauptwirkung aufweisen. Über den Zeitpunkt der bauaufsichtlichen Einführung von DIN EN 934-2 ist noch nicht befunden worden. Tafel IV.3-19 zeigt den derzeitigen Aufbau der gesamten DIN EN 934 mit sechs Teilen.

2.4.3 Wirkungsgruppen

Als Wirkstoffe für Betonzusatzmittel können eine Vielzahl anorganischer und organischer Substanzen dienen. **Tafel II.2.4-3** gibt einen Überblick über die wesentlichen in Deutschland eingesetzten Rohstoffe für Betonzusatzmittel [DBC1]. Bei handels-

Tafel II.2.4-3: Rohstoffe für Betonzusatzmittel nach [DBC1]

Wirkungsgruppe	Rohstoffe
Betonverflüssiger (BV)	Ligninsulfonate sowie ggf. Beimischungen von Melaminsulfonaten, Naphthalinsulfonaten und/oder Polycarboxylaten
Fließmittel (FM)	Melaminsulfonate, Naphthalinsulfonate und Polycarboxylate sowie ggf. Beimischungen von Ligninsulfonaten
Luftporenbildner (LP)	Seifen aus natürlichen Harzen sowie synthetische ionische und nichtionische Tenside
Dichtungsmittel (DM)	Salze höherer Fettsäuren (i. A. Calciumstearat)
Verzögerer (VZ)	Saccharose, Gluconate, Phosphate und Ligninsulfonate
Beschleuniger (BE)	Silicate, Aluminate, Carbonate, Formiate, amorphe Aluminiumhydroxide und Aluminiumsulfat
Einpresshilfen (EH)	Aluminiumpulver sowie ggf. Beimischungen von Verflüssigern, Fließmitteln, Stabilisierern und Verzögerern
Stabilisierer (ST)	Celluloseether und Stärkeether
Chromatreduzierer (CR)	Eisen(II)sulfate
Recyclinghilfen für Waschwasser (RH)	Phosphonsäuren und Fruchtsäuren (i. A. Zitronensäure)

üblichen Betonzusatzmitteln macht der eigentliche Wirkstoffgehalt i. d. R. nur einen Anteil des Zusatzmittels aus, das darüber hinaus Trägerstoffe, wie z. B. Gesteinsmehl oder Wasser, enthält.

Die Wirkung der Betonzusatzmittel kann physikalischer und/oder chemischer Natur sein. So ist beispielsweise die Wirkungsweise von verflüssigenden oder luftporenbildenden Zusatzmitteln überwiegend physikalischer Natur, hingegen die von Beschleunigern und von Verzögerern praktisch ausschließlich chemischer Natur. Da die chemisch wirkenden Zusatzmittel ihrem Anwendungszweck entsprechend sehr stark in die chemisch-mineralogischen Reaktionen des Zements mit dem Zugabewasser eingreifen, können Änderungen in der chemischen Zusammensetzung des Zusatzmittels oder des Zements Änderungen der Betoneigenschaften zur Folge haben. Auch primär physikalisch wirkende Zusatzmittel können das Erstarren und Erhärten beeinflussen, insbesondere wenn sie schwankende Anteile von chemisch wirkenden Nebenbestandteilen enthalten. Deshalb erfordert die Anwendung von Betonzusatzmitteln besondere Sorgfalt und Prüfungen vor und während der Betonherstellung.

Betonverflüssiger (BV)

Betonverflüssiger sollen den für eine bestimmte Verarbeitbarkeit erforderlichen Wassergehalt des Betons verringern oder die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessern. Die durch Betonverflüssiger mögliche Wassereinsparung ist abhängig vom jeweiligen Zusatzmittel und von der Betonzusammensetzung. Sie ist bei steifem Beton geringer als bei weichem und liegt im Allgemeinen zwischen 5 und 15%. Als Nebenwirkungen können beim Einsatz von Betonverflüssigern Luftporenbildung und Bluten sowie Erstarrungsverzögerungen auftreten.

Fließmittel (FM)

Fließmittel bewirken eine starke Verflüssigung des Frischbetons und haben insbesondere für die Herstellung von Fließbeton

[Ri4] sowie für die Herstellung von hochfestem Beton mit sehr niedrigen Wasserzementwerten eine große Bedeutung. Sachgerecht eingesetzte Fließmittel ergeben einen weichen bis fließfähigen, leicht verarbeitbaren Frischbeton mit gutem Zusammenhaltevermögen. Die Festbetoneigenschaften, wie z. B. die Druckfestigkeit, entsprechen bei deutlich günstigerer Verarbeitbarkeit etwa denen des Ausgangsbetons mit gleichem w/z-Wert und Zementgehalt. Allerdings ist die verflüssigende Wirkung dieser Zusatzmittel im Allgemeinen zeitlich auf etwa 15 bis 45 Minuten begrenzt. Deshalb werden sie bei Transportbeton in der Regel erst auf der Baustelle dem Beton im Mischfahrzeug vor der Übergabe zugegeben. Die neu entwickelten Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatethern weisen diesen Nachteil nicht mehr auf und ergeben fließfähige Betone, die auch nach einer Stunde keine signifikante Konsistenzabnahme aufweisen.

Als Nebenwirkungen können beim Einsatz von Fließmitteln, genau wie bei Betonverflüssigern, Luftporenbildung, Bluten und Erstarrungsverzögerungen auftreten.

Luftporenbildner (LP)

Luftporenbildner sollen eine ausreichende Menge von Mikroluftporen gleichmäßig verteilt in den Beton einführen, um einen hohen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand zu erzielen. Die Bildung der Luftporen im Beton ist unter anderem von der Temperatur, der Zusammensetzung, der eingetragenenen Mischenergie, von der Konsistenz des Frischbetons und von der Zementart abhängig. So nimmt die erforderliche Zusatzmittelmenge zur Erzielung eines bestimmten Luftporengehalts mit steigenden Umgebungstemperaturen deutlich zu. Bei sehr steifem Beton, wie z. B. Betonwaren, ist es meist nicht möglich, eine ausreichende Menge von Mikroluftporen ein-

zuführen. Bei erdfeuchten Betonen mit Wasserzementwerten < 0,40 ist ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand jedoch im Allgemeinen auch ohne künstlich eingeführte Luftporen gegeben.

Der Luftgehalt gilt für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand als ausreichend, wenn der Gehalt an Mikroluftporen bis 0,3 mm Durchmesser bei einem Größtkorn des Zuschlags von 32 mm mindestens 1,5% beträgt oder wenn der Abstandsfaktor nicht größer als 0,20 mm ist. Da diese Kennwerte nur am erhärteten Beton ermittelt werden können, sollten diese aufwendigen Prüfungen nur bei der Wirksamkeitsprüfung oder in Zweifelsfällen verlangt werden. Bei der Verwendung von zugelassenen LP-Mitteln kann ein ausreichender Gehalt an Mikroluftporen angenommen werden, wenn der einfacher zu prüfende Luftgehalt des Frischbetons bestimmte Werte nicht unterschreitet [Me96].

Bei der gemeinsamen Verwendung eines Luftporenbildners und eines Fließmittels muss deren Verträglichkeit überprüft werden, da Fließmittel im Frischbeton den Mikroluftporengehalt beeinträchtigen können [Nis1].

Da Luftporen die Zementleimmenge erhöhen, kann die Verarbeitbarkeit des Frischbetons etwas verbessert oder der Wasser- und gegebenenfalls auch der Mehlkorngehalt des Betons vermindert werden. Im Festbeton führt das erhöhte Porenvolumen des Zementsteins zu einer geringen Verminderung der Festigkeit, insbesondere der Druckfestigkeit. Die Druckfestigkeit wird um rd. 1 bis 2 N/mm² je 1 Vol.-% Luftporen vermindert.

Dichtungsmittel (DM)

Dichtungsmittel sollen die Wasseraufnahme bzw. das Eindringen von Wasser in Beton vermindern. Dies soll durch eine Hydrophobierung des Kapillarporensystems und/oder durch ein Verstopfen der Poren durch Quelleffekte der eingesetzten Metallsei-

fen erreicht werden. Metallseifen sind grenzflächenaktiv und können verflüssigend wirken.

Die Bedeutung der Dichtungsmittel für die Betontechnologie wird vielfach überschätzt, da die Wasserundurchlässigkeit und die Wasseraufnahme eines mit ausreichend niedrigem Wasserzementwert hergestellten Betons durch Dichtungsmittel meist nicht signifikant oder dauerhaft verbessert werden [Wis3]. Durch Dichtungsmittel kann Luft in den Beton eingeführt und dadurch die Festigkeit vermindert werden.

Verzögerer (VZ)

Verzögerer sollen den Zeitraum, in dem der Frischbeton verarbeitbar bleiben soll, deutlich, d. h. um mehrere Stunden, verlängern. Da sie das Erstarren und die Anfangserhärtung des Zements verzögern, wird gegebenenfalls ein späteres Ausschalen und eine längere Nachbehandlung des Betons erforderlich. Verzögernde Zusatzmittel werden in erster Linie bei hohen Temperaturen und Unterbrechungen des Betoniervorgangs sowie bei großen Bauteilen zur Vermeidung von Arbeitsfugen angewendet.

Die meisten Verzögerer weisen gleichzeitig eine verflüssigende Wirkung auf. Da sie frühzeitig in die Hydratationsreaktionen des Zements mit dem Zugabewasser eingreifen, können sie das bei der Zementherstellung optimierte Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten je nach Art des Wirkstoffs, der Zugabemenge, dem Zugabezeitpunkt und den Umgebungsbedingungen bei der Betonherstellung mehr oder weniger stark verändern. Beim Einsatz von Verzögerern kann ein Umschlagen, d. h. eine Beschleunigung des Erstarrens auftreten. Außerdem können Verzögerer trotz Frühansteifens eine große Spreizung zwischen Beginn und Ende des Erstarrens sowie eine ausgeprägte Verzögerung der Anfangserhärtung des Betons auslösen. In solchen Fällen müs-

sen besondere Maßnahmen für die Nachbehandlung und gegen die Rissbildung infolge Kapillarschwindens ergriffen werden.

Die Zugabemenge des Verzögerers muss unbedingt auf die für die Verzögerung erforderliche Menge beschränkt werden. Entsprechend der DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit [Ri3] sind gesonderte Prüfungen erforderlich, wenn die Verarbeitbarkeitszeit mehr als zwölf Stunden beträgt. In Sonderfällen, z. B. bei Langzeitverzögerung, darf bei Transportbeton der Verzögerer dem Fahrzeugmischer auf der Baustelle zugegeben werden, wenn ausreichende Erstprüfungen vorliegen. Einen sorgfältigen Einbau und eine gute Nachbehandlung vorausgesetzt, die bei verzögertem Beton besonders wichtig sind, liegt die Druckfestigkeit eines solchen Betons in höherem Alter häufig über jener eines sonst gleichen Betons ohne Verzögerer.

Beschleuniger (BE)

Beschleuniger sollen das Erstarren bzw. das Erhärten des Betons deutlich beschleunigen. Bei der Anwendung von Beschleunigern wird zwischen Erstarrungsbeschleunigern, die vorwiegend den Erstarrungsbeginn deutlich vorverlegen, und solchen, die besonders die Anfangserhärtung beschleunigen, unterschieden. Beschleuniger werden verschiedentlich bei tiefen Temperaturen, zum schnellen Ausschalen sowie zu Ausbesserungsarbeiten und Sonderaufgaben genutzt. Für Spritzbeton werden sie häufig eingesetzt, wenn keine besonderen Spritzzemente zur Anwendung kommen.

Wie bei Verzögerern muss die Zugabemenge der Beschleuniger sorgfältig auf die Baustellenverhältnisse abgestimmt werden. Beton mit Beschleuniger kann ein größeres Schwinden aufweisen als nicht beschleunigter Beton. Durch Beschleuniger wird

die Frühfestigkeit des Betons im Allgemeinen erhöht, die Festigkeit im höheren Alter jedoch im Vergleich zum Beton ohne Zusatzmittel vermindert. Beschleuniger auf Basis von Alkalisilicaten, so genannte Wassergläser, können die Endfestigkeit des Betons in einem erheblichen Ausmaß erniedrigen [Man2]. Aufgrund der erhöhten Porosität und der durch das Zusatzmittel erhöhten Alkalität des Betons sind mit Alkalisilicaten beschleunigte Betone, z. B. im Hinblick auf mögliche Auslaugungen, ökologisch bedenklich.

Einpresshilfen (EH)

Einpresshilfen für Einpressmörtel sollen bei Spannbeton eine vollständige Ausfüllung aller Hohlräume in den Spannglied-Hüllrohren erleichtern. Um dies zu erreichen, sollen Einpresshilfen den Wasseranspruch und das Absetzen des Einpressmörtels vermindern sowie die Fließfähigkeit des Mörtels verbessern und ein mäßiges Quellen bewirken. Einpresshilfen enthalten daher treibende, verflüssigende, stabilisierende und leicht verzögernde Komponenten zur Verlängerung der Verarbeitbarkeitszeit. Die Wirkung der Einpresshilfen ist in erster Linie von der Temperatur, der Zusammensetzung des Zements, der Mischintensität und der Zugabemenge der Einpresshilfe abhängig.

Stabilisierer (ST)

Stabilisierer sollen eine Entmischung des Frischbetons, insbesondere das Absondern von Wasser (Bluten), vermindern und das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons und seine Verarbeitbarkeit verbessern. Als Stabilisierer werden u. a. Gelierungsmittel, wie Cellulosederivate, eingesetzt. Ihre Wirkung beruht darauf, dass sie mit dem Zugabewasser quellen und dadurch den Scherwiderstand der Mehlkornsuspension erhöhen. Abgestimmte Zugabemengen eines Stabilisierers können den Zu-

sammenhalt des Frischbetons, z. B. für Unterwasserbeton, bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit verbessern. Bei höheren Zugabemengen kann die Verarbeitbarkeit jedoch stark herabgesetzt werden. Deshalb ist bei der Anwendung von Stabilisierern immer ein Kompromiss zwischen der Verbesserung des Zusammenhaltevermögens und der Verarbeitbarkeit zu schließen. Stabilisierer können insbesondere bei hohen Zugabemengen das Erstarren verzögern und die Festigkeit des Betons mindern.

Chromatreduzierer (CR)

Chromatreduzierer sollen den aus dem Zement stammenden wasserlöslichen Anteil an Chrom(VI)-Verbindungen zu Chrom(III)-Verbindungen reduzieren. Dafür werden überwiegend Eisen(II)sulfate verwendet. Bei Dosierungen von 0,2 bis 0,5 M.-%, bezogen auf den Zement, ist von einer ausreichenden chromatreduzierenden Wirkung auszugehen. Der Einfluss von Eisen(II)sulfaten auf die Verarbeitungseigenschaften von Beton liegt i. d. R. in einem baupraktisch vernachlässigbaren Rahmen [Man3].

Recyclinghilfen für Waschwasser (RH)

Recyclinghilfen für Waschwasser sollen die Reinigung von Transportfahrzeugen und Betonmischern erleichtern und die Wiederverwendung des Waschwassers in Betrieben ermöglichen, die über kein oder nur über ein kleines Restwasserbecken verfügen (s. Abschnitt II.16.1). Recyclinghilfen für Waschwasser sind Langzeitverzögerer, die die Hydratationsreaktionen des Zements sehr stark, d. h. über mehrere Tage, hemmen. Sie werden üblicherweise mit dem Waschwasser zugegeben, das dann z. B. über ein Wochenende in der Mischertrommel verbleiben kann. Beim erneuten Befüllen des Mischers ersetzt das Waschwasser den entsprechenden Anteil an Zugabewasser des Frischbetons.

Obwohl in den Zulassungsrichtlinien des DIBt [Ri23] die Wirkungsgruppe Recyclinghilfen für Restbeton (RB) nicht aufgeführt ist, kann die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung einer Recyclinghilfe auch diesen Anwendungsbereich umfassen (siehe DIBt-Zulassungs-Nr. Z-3.2.10-1199). Recyclinghilfen für Restbeton sollen die Wiederverwendung von Restbeton bis zu einer Liegezeit von 72 Stunden ermöglichen. Die Aktivierung des verzögerten Restbetons nach der vorgesehenen Liegezeit erfolgt durch die Zuladung von mindestens der vierfachen Menge an Frischbeton. Da Recyclinghilfen extrem in die Hydratationsreaktionen des Zements mit dem Zugabewasser eingreifen, erfordert der Einsatz dieser Mittel eine besondere Sorgfalt. Dementsprechend ist die Zulassung mit einer Vielzahl von Auflagen, Ausführungsbestimmungen und durchzuführenden Prüfungen verbunden. Bislang liegen keine umfangreichen baupraktischen Erfahrungen mit Betonen vor, bei denen Recyclinghilfen für Waschwasser bzw. Restbeton eingesetzt wurden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei diesen Zusatzmitteln die gleichen Nebenwirkungen auftreten können wie bei Verzögerern.

2.4.4 Umweltverträglichkeit

Die Rohstoffe von Betonzusatzmitteln sind in den meisten Fällen *toxikologisch unbedenkliche Substanzen*, die mit Ausnahme der in **Tafel II.2.4-4** aufgelisteten Stoffe gemäß Gefahrstoffverordnung bzw. EG-Richtlinie 67/548/EWG nicht kennzeichnungspflichtig sind [DBC1]. Die Herstellung der Betonzusatzmittel aus den Rohstoffen erfolgt in einem Mischprozess, bei dem keine chemischen Reaktionen ablaufen. Deshalb kann bei ihrer toxikologischen Klassifizierung von der Einstufung der Komponenten unter Berücksichtigung des Gehalts ausgegangen werden. Hinsichtlich einer möglichen Wassergefährdung sind Betonzusatzmittel als nicht oder schwach wassergefährdend

Tafel II.2.4-4: Kennzeichnung der Rohstoffe für Betonzusatzmittel gemäß Gefahrstoffverordnung bzw. EG-Richtlinie 67/548/EWG [DBC1]

Rohstoff	Kennzeichnung nach Gefahrstoffverordnung bzw. EG-Richtlinie 67/548/EWG
Silicate (Na- oder K-Salz)	reizend (Xi) bis ätzend (C)
Aluminate (Na- oder K-Salz)	ätzend (C)
Carbonate (Na- oder K-Salz)	reizend (Xi)
Harzseifen (Na- oder K-Salz)	reizend (Xi) bis ätzend (C)
Tenside	reizend (Xi)
Zitronensäure	reizend (Xi)
Eisen(II)sulfat	gesundheitsschädlich (Xn)

eingestuft, mit Ausnahme der Harzseifen und Tenside, die als wassergefährdend gelten. Für eine Bewertung der Umweltverträglichkeit ist jedoch nicht das Zusatzmittel an sich maßgebend, sondern nur der aus Betonen *freisetzbare Anteil*. Dieser wird durch die Reaktion der Zusatzmittel mit den Hydratationsprodukten und die Einkapselung in die dichte Zementsteinmatrix bestimmt. Bei den eher physikalisch wirkenden Zusatzmitteln findet eine Immobilisierung durch sorptive Bindungen statt [Spa1], während z. B. Aluminiumhydroxide oder -sulfate als Betonzusatzmittelwirkstoffe in die Hydratphasen eingebaut werden [DBC1].

In **Bild II.2.4-1** ist für Versuchszeiten von sieben Tagen der zeitliche Verlauf der sorbierten Mengen der Rohstoffe für verflüssigende Betonzusatzmittel Calciumlignin-, Natriummelamin- und Natriumnaphthalin-Sulfonat an einem Portlandzement in Pro-

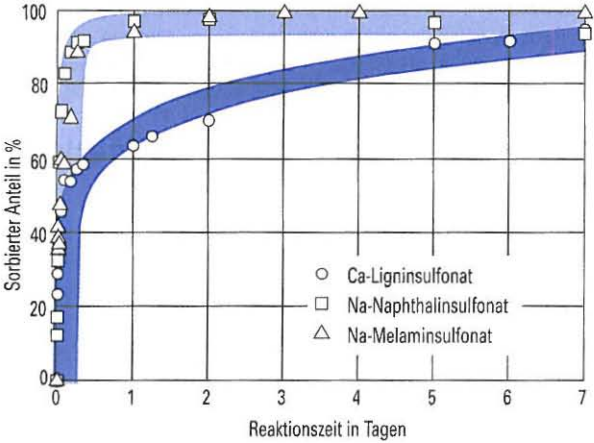


Bild II.2.4-1: Zeitliche Abhängigkeit der an einem Portlandzementstein sorbierten Anteile von Calciumlignin-, Natriumnaphthalin- und Natriummelaminsulfonat

zent der Ausgangsmenge dargestellt. Aus dem Bild geht hervor, dass diese Grundstoffe innerhalb kurzer Zeit zu mehr als 50% an den Zement angelagert werden. Mit fortschreitender Hydratation des Zements nimmt die Sorption stetig zu. Nach sieben Tagen sind die drei Grundstoffe zu mehr als 90% sorbiert. Porenwasseruntersuchungen an 28-Tage alten Zementsteinen bestätigen das Ergebnis der Sorptionsversuche. Aus den im Porenwasser ermittelten Konzentrationen der Rohstoffe ergibt sich, dass diese zu etwa 95% am Zement sorbiert sind. Bei Auslaugversuchen hat sich gezeigt, dass nur der im Porenwasser gelöst vorliegende Anteil von rd. 5% der ursprünglichen Zugabemenge an Zusatzmittel mobilisierbar ist. Bei gefügedichten Betonbauteilen, wie sie in der Praxis vorliegen, ergeben sich dabei aufgrund der dif-

fusionskontrollierten Eluationsgeschwindigkeit nur sehr geringe Freisetzungsraten der ohnehin nur in geringen Mengen – im Allgemeinen weniger als 1% als Trockensubstanz, bezogen auf den Zementgehalt – im Betonbau eingesetzten Betonzusatzmittel.

2.5 Zuschlag (Gesteinskörnungen) für Beton und Mörtel

2.5.1 Definitionen, Begriffe, Normen

Zuschlag ist ein Gemenge von ungebrochenen oder gebrochenen Gesteinskörnern, die natürlich gewonnen oder künstlich hergestellt werden. Weiterhin gibt es rezyklierten Zuschlag, der aus Beton- oder Mauerwerksbruch aufbereitet wird. Unter der Einwirkung von Wasser darf Zuschlag weder erweichen noch sich zersetzen. Er soll mit den Zementbestandteilen keine schädlichen Verbindungen eingehen und darf die Dauerhaftigkeit des Bauteils nicht vermindern. Bei der Verwendung für bewehrte Betonbauteile ist sicherzustellen, daß der Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigt wird.

Zuschlag ist in DIN 4226 genormt. Zurzeit gilt noch DIN 4226 Ausgabe April 1983 mit Teil 1 für Zuschlag mit dichtem Gefüge, Teil 2 für Zuschlag mit porigem Gefüge, Teil 3 für die Prüfung und Teil 4 für die Überwachung des Zuschlags. Eine generelle Überarbeitung wurde in Anlehnung an den Entwurf der europäischen Norm prEN 12620 durchgeführt. Die zukünftige DIN 4226 erhält die Bezeichnung „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel" und hat drei Teile:

Teil 1 normale und schwere Gesteinskörnungen
Teil 2 leichte Gesteinskörnungen
Teil 100 rezyklierte Gesteinskörnungen

Der Entwurf für Teil 1 ist im Dezember 1999 erschienen, die Entwürfe für Teil 2 und Teil 100 werden voraussichtlich im Juli

2000 folgen. Es ist beabsichtigt, den Teil 100 zu einem späteren Zeitpunkt in die Teile 1 und 2 zu integrieren. Die Überwachung des Zuschlags wurde in die Teile 1, 2 und 100 eingearbeitet. Die bisher in Teil 3 enthaltenen Prüfverfahren für Zuschlag werden zu einem späteren Zeitpunkt durch die europäische Normen DIN EN 932, 933, 1097, 1367 und 1744 ersetzt.

Die Angaben in diesem Abschnitt II.2.5 beziehen sich – sofern nicht besonders erwähnt – auf die Entwürfe der einzelnen Teile der neuen DIN 4226. Da die europäische Normung sowohl Zuschlag für Beton als auch Gesteinskörnungen (engl. aggregate) für andere Anwendungsgebiete berücksichtigt, wurden in Deutschland die Entwürfe der einzelnen Teile von DIN 4226 mit „Gesteinskörnungen für Mörtel und Beton" bezeichnet. Bis sich dieser Begriff durchgesetzt hat, wird auch in diesem Taschenbuch der Ausdruck „Zuschlag" verwendet.

Die Zuschlagarten werden entsprechend der Herkunft, des Gefüges und der Kornrohdichte eingeteilt. Eine Übersicht gibt **Tafel II.2.5-1**. Die Verwendung des Leicht-, Normal- und Schwerzuschlags ist in E DIN 1045-2, die des rezyklierten Zuschlags in der Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag" des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton [Ri1] (s. Abschnitt II.16.2) geregelt.

2.5.2 Normalzuschlag

Normalzuschlag hat eine Rohdichte zwischen 2,0 und 3,0 kg/dm³. Zum natürlichen Normalzuschlag gehören Kies und Sand, die natürlich gerundet sind, sowie Splitt und Brechsand, die durch Zerkleinern von Felsgestein oder Kies gewonnen werden. **Tafel II.2.5-2** zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Gesteinsarten für Normalzuschlag und ihre kennzeichnenden Eigenschaften. Die mineralogische Zusammensetzung der Kiese und Sande

Tafel II.2.5-1: Übersicht über die Zuschlagarten

Zuschlagart	natürlicher Zuschlag	
	natürlich gekörnt	mechanisch zerkleinert
Normalzuschlag	Flusssand, Flusskies, Grubensand, Grubenkies, Moränesand, Dünensand	Brechsand, Splitt und Schotter aus geeigneten Natursteinen
Leichtzuschlag	Bims, Lavakies, Lavasand	gebrochener Bims
leichter Leichtzuschlag		gebrochene Schaumlava, gebrochener Tuff
Schwerzuschlag	Baryt (Schwerspat), Magnetit	Baryt, Magnetit, Roteisenstein, Ilmenit, Hämatit
rezyklierter Zuschlag		

ist sehr heterogen und kann je nach Lagerungsstätte sehr stark wechseln. Dagegen haben aus Felsgestein hergestellte Splitte und Brechsande eine homogenere mineralogische Zusammensetzung. Je nach Abbauhorizont der Lagerstätte treten jedoch auch bei ihnen stärkere Schwankungen nicht nur der Zusammensetzung, sondern auch der Eigenschaften wie z.B. Festigkeit und Widerstand gegen äußere Einflüsse auf.

Zum künstlichen Zuschlag gehört u. a. die Hochofenstückschlacke, die man durch langsames Abkühlen der flüssigen Hochofenschlacke erhält. Die Hochofenschlacke wird nach dem Abkühlen gebrochen.

Wasseraufnahme nach DIN 52103 M.-%	Druck-festigkeit N/mm²	E-Modul kN/mm²	Wärmedehnzahl (Temperatur-bereich 0–60 °C) 10^{-6}/K
0,2–0,5	160–240	38–76	7,4
0,2–0,4	170–300	50–60	6,5
0,2–0,7	180–300	25–65	7,4
0,1–0,3	250–400	96 (ρ_R = 3,05)	6,5
0,2–0,5	150–300	60 (ρ_R = 2,63)	11,8
0,2–0,5	120–200	10–20	11,8
0,2–9,0	30–180	2–15	11,0
0,1–0,6	80–180	82 (ρ_R = 2,69)	5,0 bis 11,5
0,2–10,0	20–90	–	
0,4–5,0	80–240	34 (ρ_R = 2,60)	5,5

2.5.4 Schwerzuschlag

Schwerzuschlag hat eine Rohdichte von mindestens 3,0 kg/dm³. Mit ihm lässt sich in Abhängigkeit von Volumenanteil und Kornrohdichte die für die Abschwächung der radioaktiven Strahlung maßgebliche Betonrohdichte auf Werte von 2,8 kg/dm³ bis zu rd. 6,0 kg/dm³ einstellen. Durch wasserstoffhaltige Schwerzuschläge werden schnelle Neutronen abgebremst. Zur Absorption der ab-

Tafel II.2.5-3: Übersicht über die wichtigsten Leichtzuschlagarten und ihre kennzeichnenden Eigenschaften

Stoffgruppe	Kornrohdichte kg/dm³	Schüttdichte (lose eingefüllt) kg/dm³	Dichte (Reindichte) kg/dm³	Kornfestigkeit
Leichtzuschlag für Beton nach E DIN 1045-2				
Naturbims	0,4 bis 0,7	0,3 bis 0,5	rd. 2,5	niedrig
Schaumlava	0,7 bis 1,5	0,5 bis 1,3	rd. 3,0	mittel
Hüttenbims	0,5 bis 1,5	0,4 bis 1,3	2,9 bis 3,0	niedrig bis mittel
Sinterbims	0,5 bis 1,8	0,4 bis 1,4	2,6 bis 3,0	niedrig bis mittel
Ziegelsplitt	1,2 bis 1,8	1,0 bis 1,5	2,5 bis 2,8	mittel
Blähton, Blähschiefer	0,4 bis 2,0	0,3 bis 1,5	2,5 bis 2,7	niedrig bis hoch
hochwärmedämmender, anorganischer Leichtzuschlag				
Blähperlit	0,1 bis 0,2	0,1 bis 0,2	2,3 bis 2,5	sehr niedrig
Blähglimmer	0,1 bis 0,3	0,1 bis 0,3	2,5 bis 2,7	sehr niedrig
Schaumsand, Schaumkies	0,1 bis 0,3	0,1 bis 0,3	2,5 bis 2,7	sehr niedrig
organischer Leichtzuschlag				
geschäumter Kunststoffzuschlag	<0,1	<0,1	rd. 1,0	sehr niedrig

künstlicher Zuschlag	Kornrohdichte in kg/dm³
Hochofenschlacke, Metallhüttenschlacke, Klinkerbruch, Sintersplitt, Hartstoffe wie künstl. Korund und Silicium-Karbid	≥ 2,0 – < 3,0
Blähschiefer, Blähton, Ziegelsplitt	0,4 – 2,0
Perlit, Schaumglasgranulat, Schaumkunststoffe, geschäumter Kunststoffzuschlag	0,1 – 0,4
Stahlgranalien, Ferrosilicium, Schwermetallschlacke, Stahlsand, Ferrophosphor	≥ 3,0
Betonsplitt, Betonbrechsand, Bauwerkssplitt, Bauwerksbrechsand	≥ 2,0
Mauerwerkssplitt, Mauerwerksbrechsand	≥ 1,8
Mischsplitt, Mischbrechsand	≥ 1,5

2.5.3 Leichtzuschlag

Leichtzuschlag hat eine Rohdichte von weniger als 2,0 kg/dm³. Es wird zwischen zwei Arten von Leichtzuschlag unterschieden:

1. Leichtzuschlag, wie z. B Blähton und Blähschiefer, mit einer Rohdichte zwischen 0,4 und 2,0 kg/dm³ hat mit steigender Rohdichte eine ausreichende Korneigenfestigkeit, um mit ihm Leichtbeton bis zu einer Festigkeitsklasse LC 80/88, also auch hochfesten Leichtbeton, herzustellen.
2. Leichter Leichtzuschlag hat eine Rohdichte unter 0,4 kg/dm³ und kann organischen oder anorganischen Ursprungs sein. Er

Tafel II.2.5-2: Gesteinseigenschaften von Normalzuschlag*)

Gesteinsart	Rohdichte ρ_R kg/dm³	Dichte ρ kg/dm³
Granit	2,60–2,65	2,62–2,85
Diorit, Gabbro	2,80–3,00	2,85–3,05
Quarzporphyr	2,55–2,80	2,58–2,83
Basalt	2,90–3,05	3,00–3,15
Quarzit, Grauwacke	2,60–2,65	2,64–2,68
Quarzitischer Sandstein	2,60–2,65	2,64–2,68
sonstiger Sandstein	2,00–2,65	2,64–2,72
Dichte Kalksteine	2,65–2,85	2,70–2,90
sonstige Kalksteine	1,70–2,60	2,70–2,74
Hochofenschlacke	2,50–2,90	2,90–3,10

*) Die Werte stammen aus Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie sowie aus DIN 52100-2 und [Det1, Kei1, Krä1 und Neu1].

wurde in E DIN 4226-2 neu aufgenommen. In erster Linie wird er für wärmedämmende Betone und Mörtel verwendet, die wegen der geringen Festigkeit für tragende Bauteile nicht eingesetzt werden.

Tafel II.2.5-3 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Leichtzuschlagarten und ihre kennzeichnenden Eigenschaften.

gebremsten Neutronen sind Borverbindungen am besten geeignet. Folgende Schwerzuschläge kommen in Frage: Baryt (Schwerspat), Eminit (Titaneisenstein), Magnetit (Magneteisenstein), Hämatit (Roteisenstein), Schwermetallschlacken (vorwiegend Blei- oder Chromschlacken), Ferrosilicium, Ferrophosphor und Stahl entweder als Granalien mit überwiegend kugeliger Kornform oder als Stahlsand mit kugeliger oder kantiger Kornform.

2.5.5 Rezyklierter Zuschlag

Aus Gründen der Ressourcenschonung sowie des Umweltschutzes und der Energieeinsparung wird seit einigen Jahren auch *rezyklierter Zuschlag*, der aus der Aufbereitung bereits verwendeter Baustoffe stammt, als Zuschlag eingesetzt. **Tafel II.2.5-4** zeigt die im Entwurf der DIN 4226-100 vorgeschlagenen vier Typen von rezykliertem Zuschlag. Zur Verwendung von Betonbruch wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt; der Einsatz als Zuschlag ist in der DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag [Ri1] geregelt (s. Abschnitt II.16.2.3). Danach darf für Beton nach E DIN 1045-2 entsprechend der Richtlinie nur Zuschlag des Typs 1 verwendet werden. In Zukunft dürfen auch die Typen 2 und 3 für untergeordnete Betone bis etwa zu einer Festigkeitsklasse C 25/30 eingesetzt werden. Der Typ 4 kann nur für unbewehrten Beton bis zur Festigkeitsklasse C 8/10 verwendet werden, der nicht für tragende Bauteile eingesetzt wird.

2.5.6 Eigenschaften und Anforderungen

Je nach Verwendungszweck – z. B. für tragende Bauteile oder wärmedämmende Betone – muß Zuschlag sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und Anforderungen erfüllen. Im Folgenden werden in erster Linie die Eigenschaften und Anforde-

Tafel II.2.5-4: Zusammensetzung und Einsatzmöglichkeiten von verschiedenen rezyklierten Zuschlägen

Gesteinsart	Bestandteile in M.-%						
	Beton, Zuschlag nach E DIN 4226-1	Klinker nicht porosierter Ziegel	Kalksandstein	andere mineralische Bestandteile	Fremdbestandteile		
					Asphalt	mineralisch	nicht mineralisch
Betonsplitt/ Betonbrechsand (Typ 1)	≥ 90	≤ 10		≤ 2	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Bauwerkssplitt/ Bauwerksbrechsand (Typ 2)	≥ 70	≤ 30		≤ 3	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Mauerwerkssplitt/Mauerwerksbrechsand (Typ 3)	≤ 20	≥ 80	≤ 5	≤ 5	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Mischsplitt/ Mischbrechsand (Typ 4)	≥ 80			≤ 20			≤ 1

[1] Rezyklierter Splitt und rezyklierter Brechsand
[2] Entwurf DIN 4226-100: 2000

rungen behandelt, die für tragende Bauteile nach E DIN 1045 erforderlich sind.

Korngruppe

Eine *Korngruppe* wird nach der oberen und der unteren Siebgröße bezeichnet, z. B. 4/16 für Zuschlag, dessen Korngrößen

gebremsten Neutronen sind Borverbindungen am besten geeignet. Folgende Schwerzuschläge kommen in Frage: Baryt (Schwerspat), Eminit (Titaneisenstein), Magnetit (Magneteisenstein), Hämatit (Roteisenstein), Schwermetallschlacken (vorwiegend Blei- oder Chromschlacken), Ferrosilicium, Ferrophosphor und Stahl entweder als Granalien mit überwiegend kugeliger Kornform oder als Stahlsand mit kugeliger oder kantiger Kornform.

2.5.5 Rezyklierter Zuschlag

Aus Gründen der Ressourcenschonung sowie des Umweltschutzes und der Energieeinsparung wird seit einigen Jahren auch *rezyklierter Zuschlag*, der aus der Aufbereitung bereits verwendeter Baustoffe stammt, als Zuschlag eingesetzt. **Tafel II.2.5-4** zeigt die im Entwurf der DIN 4226-100 vorgeschlagenen vier Typen von rezykliertem Zuschlag. Zur Verwendung von Betonbruch wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt; der Einsatz als Zuschlag ist in der DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag [Ri1] geregelt (s. Abschnitt II.16.2.3). Danach darf für Beton nach E DIN 1045-2 entsprechend der Richtlinie nur Zuschlag des Typs 1 verwendet werden. In Zukunft dürfen auch die Typen 2 und 3 für untergeordnete Betone bis etwa zu einer Festigkeitsklasse C 25/30 eingesetzt werden. Der Typ 4 kann nur für unbewehrten Beton bis zur Festigkeitsklasse C 8/10 verwendet werden, der nicht für tragende Bauteile eingesetzt wird.

2.5.6 Eigenschaften und Anforderungen

Je nach Verwendungszweck – z. B. für tragende Bauteile oder wärmedämmende Betone – muß Zuschlag sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und Anforderungen erfüllen. Im Folgenden werden in erster Linie die Eigenschaften und Anforde-

Tafel II.2.5-4: Zusammensetzung und Einsatzmöglichkeiten von verschiedenen rezyklierten Zuschlägen

Gesteinsart	Bestandteile in M.-%						
	Beton, Zuschlag nach E DIN 4226-1	Klinker nicht porosierter Ziegel	Kalksandstein	andere mineralische Bestandteile	Fremdbestandteile		
					Asphalt	mineralisch	nicht mineralisch
Betonsplitt/ Betonbrechsand (Typ 1)	≥ 90	≤ 10		≤ 2	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Bauwerkssplitt/ Bauwerksbrechsand (Typ 2)	≥ 70	≤ 30		≤ 3	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Mauerwerkssplitt/Mauerwerksbrechsand (Typ 3)	≤ 20	≥ 80	≤ 5	≤ 5	≤ 1	≤ 2	≤ 0,5
Mischsplitt/ Mischbrechsand (Typ 4)	≥ 80			≤ 20			≤ 1

[1] Rezyklierter Splitt und rezyklierter Brechsand
[2] Entwurf DIN 4226-100: 2000

rungen behandelt, die für tragende Bauteile nach E DIN 1045 erforderlich sind.

Korngruppe

Eine *Korngruppe* wird nach der oberen und der unteren Siebgröße bezeichnet, z. B. 4/16 für Zuschlag, dessen Korngrößen

minimale Korn-rohdichte	maximale Wasserauf-nahme	Einsatzmöglichkeiten von rezykliertem Splitt in % vom Gesamtzuschlag[2]		
		Beton nach DIN 1045		unbewehrter Beton z. B. Sauberkeits-schichten, Unterbeton, Rückenstütz-beton[1]
kg/dm³	M.-%	Innenbauteil	Außenbauteil	
2,0	10	50	20	100
2,0	15	40	–	100
1,8	20	40	–	100
1,5	k.A.	–	–	100

zwischen 4 und 16 mm liegen. E DIN 4226-1 gibt absolute Grenzwerte bzw. zulässige Toleranzwerte für die Einhaltung der Kornzusammensetzung einer Korngruppe an. Die Toleranzwerte beziehen sich auf die vom Hersteller angegebene mittlere Zusammensetzung.

Kornform

Die *Kornform* wird meist nach Augenschein beurteilt. Nur in Zweifelsfällen wird eine Bestimmung nach DIN EN 933-3 bzw. DIN EN 933-4 vorgenommen. Als ungünstig geformt gelten dabei Körner, deren Verhältnis Länge zur Breite 3:1 ist. Die Kornform und die Kornoberfläche sind vor allem bei der Verarbeitbarkeit des Frischbetons von Bedeutung. Kubische Zuschlagkörner lassen sich weit besser verarbeiten als längliche.

Kornrohdichte und Wasseraufnahme

Kornrohdichte und *Wasseraufnahme* lassen sich für Normalzuschlag einfach prüfen; beide Größen schwanken für eine Zuschlagart nur in geringem Maße. Die Wasseraufnahme kann bei Normalzuschlag nur bei porösen Bestandteilen, wie z. B. Sandstein, eine gewisse Bedeutung für die Betonherstellung erlangen. Wichtig ist die Wasseraufnahme von Leichtzuschlag und rezykliertem Zuschlag. Das in die Körner aufgesaugte Wasser steht für den wirksamen w/z-Wert nicht zur Verfügung. Das in den rezyklierten Zuschlägen und den Leichtzuschlägen enthaltene Wasser oder das in der Frischbetonphase vom Zuschlag aufgenommene Wasser wird deshalb bei der Berechnung des Wasserzementwerts nicht berücksichtigt. Gegebenenfalls trägt es jedoch zu einer inneren Nachbehandlung des Betons (s. Abschnitt II.16.2) bei. Die Menge Wasser, die ein Zuschlag in einem Zeitraum von 10 Minuten aufnimmt, dient als Anhaltswert für das in einer Betonmischung zusätzlich zuzugebende Wasser.

Festigkeit

Die Zuschlagkörner müssen so fest sein, dass sie eine Herstellung von Beton üblicher *Festigkeit*sklassen gestatten. Im Allgemeinen wird Zuschlag aus gebrochenem Naturstein als ausreichend fest für die Herstellung von Beton nach E DIN 1045-2

Die Härte von Gestein kann nach der Härteskala (Ritzhärte) von Mohs festgelegt werden. Der direkte Verschleißwiderstand wird nach DIN EN 1097-1 bestimmt.

Im Allgemeinen weisen Gesteine mit einem hohen *Verschleißwiderstand* auch einen hohen Widerstand gegen Polieren auf und eignen sich daher für Betonstraßendecken. Der Polierwiderstand wird nach E DIN EN 1097-8 als PSV-Wert (Polishing Stone Value) geprüft.

Frostwiderstand

Für Betonbauteile, die bei starker Durchfeuchtung häufigen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind, z. B. horizontale Betonflächen im Freien und Bauwerke des Wasserbaus, ist ein erhöhter *Frostwiderstand* des Zuschlags erforderlich. Dieser kann unterstellt werden, wenn bei der Prüfung mit starker Durchfeuchtung (Einfrieren des Zuschlags unter Wasser nach DIN EN 1367-1) der für den vorgesehenen Verwendungszweck zugelassene Masseverlust nicht überschritten wird. Für nur mäßige Frosteinwirkung, z. B. im Hochbau, gilt zz. Zuschlag als ausreichend widerstandsfähig, wenn er die Prüfung nach DIN 4226-3: 1984 (Einfrieren des für begrenzte Zeit wassergelagerten Zuschlags an Luft) besteht. Im Rahmen der Überarbeitung der Norm wird dieses Verfahren zukünftig entfallen. Der Widerstand gegen Frost wird dann nur noch durch Einfrieren des Zuschlags unter Wasser geprüft. Je nach Anforderung darf der maximal zulässige Masseverlust 2 oder 4 M.-% betragen.

Soll der Zuschlag für Beton verwendet werden, der einer Einwirkung von Frost und Taumitteln ausgesetzt wird, so ist die Prüfung des Zuschlags mit dem Kristallisationsdruckverfahren (Magnesiumsulfat-Verfahren) nach DIN EN 1367-2 durchzuführen.

Die Anforderungen an den Frost-Widerstand bzw. Frost-Taumittel-Widerstand werden vom größten Teil des in Deutschland verwendeten natürlichen und künstlichen Normalzuschlags erfüllt. Einige Zuschlagarten erfüllen diese Anforderungen jedoch nicht. Insbesondere der rezyklierte Zuschlag weist bei Anwendung der oben beschriebenen Frostprüfverfahren keinen ausreichenden Frostwiderstand auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich ein Zuschlagkorn bei direkter Frostbeanspruchung im Beton oft anders verhält als im Frostprüfverfahren. Daher wird die E DIN 4226 ggf. als Gutachterfall zulassen, die Prüfung des Frostwiderstands von Zuschlag im Beton vorzunehmen, wenn der Zuschlag die direkte Frostprüfung nicht besteht.

Schädliche Bestandteile

Zu den *schädlichen Bestandteilen* gehören z. B. *abschlämmbare Bestandteile* des Zuschlags oder *Stoffe organischen Ursprungs*, durch die das Erstarren oder Erhärten des Zementleims gestört oder die Festigkeit des Betons wesentlich vermindert wird. Des weiteren gehören dazu Stoffe, die die Dauerhaftigkeit des Betons oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen (z. B. Schwefelverbindungen, stahlangreifende Stoffe). Darüber hinaus können schädliche Bestandteile, wie beispielsweise wasserlösliche Eisenverbindungen, dazu beitragen, dass die Anforderungen an Sichtbeton nicht erfüllt werden [Wei1]. Grenzen für die Menge der schädlichen Bestandteile enthält E DIN 4226-1.

Alkalilösliche Kieselsäure

In einigen Gegenden Deutschlands wird Zuschlag mit alkalilöslicher Kieselsäure verwendet, bei dessen Einsatz ggf. vorbeugende Maßnahmen zu treffen sind. Einzelheiten hierzu enthält Abschnitt II.7.6.

angesehen, wenn das Gestein Mindestwerte für den Widerstand gegen Zertrümmerung nach E DIN 4226-1 erfüllt. Auf eine Prüfung wird in der Regel verzichtet. Natürliche Kiese und Sande bestehen im Allgemeinen aus ausreichend festem Korn, weil die weniger festen Bestandteile durch die vorausgegangene Beanspruchung (z. B. Gletschertransport, Flusstransport) bereits zerfallen sind. Tafel II.2.5-2 enthält die Festigkeiten einiger Normalzuschlagarten. Bei Leichtbeton liegt die Festigkeit des Korns z. T. unterhalb der Festigkeit des Zementsteins. Die Kornfestigkeit des Leichtzuschlags wird meist mittelbar durch das Verhalten im Beton überprüft. Je nach vorgesehener Verwendung muss nach E DIN 4226-2 die Gleichmäßigkeit der Kornfestigkeit nachgewiesen werden. Dabei wird die Probe im Stahlzylinder mittels eines Druckstempels um ein vorgegebenes Maß zusammengedrückt und die dazu erforderliche Kraft gemessen. Bei Leichtzuschlag, dessen Kornanteil unter 1 mm über 50 M.-% liegt, kann die Druckfestigkeit durch Prüfung eines Mörtels mit diesem Zuschlag bestimmt werden. Tafel II.2.5-3 enthält qualitative Angaben zur Festigkeit von einigen Leichtzuschlagarten.

E-Modul

Der Zuschlag bestimmt durch seinen hohen Volumenanteil von rd. 70% im Beton das Formänderungsverhalten des Betons maßgebend (s. Abschnitt II.3). In Tafel II.2.5-2 sind die *E-Moduln* der gebräuchlichen Gesteine für Normalzuschlag angegeben. Die natürlichen Kiese und Sande bestehen in den meisten Fällen aus mehreren Gesteinsarten bzw. Mineralien, z. B. Rheinkies aus Sandstein und Quarzit, Weserkies vorwiegend aus verschiedenen Sandsteinen, Donaukies aus Sandstein, Kalkstein und Granit. Für das Gemisch kann man in grober Annäherung ein Verformungsverhalten entsprechend den anteiligen Mineralien bzw. Gesteinsarten erwarten.

Wärmedehnung

In Tafel II.2.5-2 sind die Wärmedehnzahlen von verschiedenen Gesteinsarten zusammengestellt. Für Beton, der besonders hohen Temperaturen ausgesetzt ist, sind Zuschläge zu verwenden, die eine geringe *Wärmedehnung* aufweisen und deren Wärmedehnzahl sich auch mit zunehmender Temperatur wenig ändert. Die Wärmedehnzahl von Normalzuschlag erstreckt sich über den sehr weiten Bereich von 3 bis $20 \cdot 10^{-6}$/K. Rheinkiessand weist eine Wärmedehnzahl von rd. $11 \cdot 10^{-6}$/K auf.

Bei einigen Gesteinen nimmt die Wärmedehnung nicht linear mit der Temperatur zu, sondern sie ändert sich zum Teil sogar sprunghaft. So findet z.B. bei einer Temperatur von 573 °C eine Umwandlung des Quarzes in seine Hochtemperatur-Modifikation statt. Die Umwandlung ist mit einer erheblichen Volumenzunahme verbunden, die im Beton zu einer Festigkeitsminderung führt. Es gibt keine allgemeingültigen Regeln für die Auswahl geeigneten Zuschlags für Beton, der Temperaturen oberhalb von 250 °C ausgesetzt wird. Geeigneter Zuschlag darf für den jeweiligen Temperaturbereich keine sprunghaften Veränderungen der Volumenzunahme aufweisen und sollte sich für diese Temperaturbeanspruchung bewährt haben.

Verschleiß und Polierbarkeit

Zuschlag, der an der Oberfläche des Betons starken mechanischen Beanspruchungen reibender oder schleifender Art ausgesetzt ist, wie z. B. Böden in Fabrikhallen und Lagern mit schwerem Gabelstaplerverkehr, muss besonders abriebfest und hart sein. Hierfür eignen sich so genannte Hartgesteine, zu denen Granit, Diorit, Syenit, Porphyr, Basalt und Quarzit zählen [Krä1]. Demgegenüber gehören die meisten Kalksteine, Dolomit, Sandstein, Schiefer, Tuff zu den weicheren Gesteinen.

2.5.7 Überwachung

Der Hersteller des Zuschlags muss durch eine werkseigene Produktionskontrolle sicherstellen, dass seine Produkte dem jeweiligen Teil der Norm E DIN 4226 entsprechen. Die Bestätigung erfolgt durch die Erteilung eines Übereinstimmungszertifikats nach vorangegangener Eigen- und Fremdüberwachung (s.Abschnitt II.17). Die Lieferscheine müssen entsprechend gekennzeichnet sein.

2.5.8 Kornzusammensetzung des Zuschlags

Die *Kornzusammensetzung* eines Zuschlaggemischs für Beton wird durch *Sieblinien* gekennzeichnet. Sie kann, wenn erforderlich, mit darauf bezogenen Kennwerten für die Kornverteilung oder den Wasseranspruch charakterisiert werden. Diese Kennwerte dienen der allgemeinen Beurteilung der betontechnischen Eigenschaften des Zuschlaggemischs.

E DIN 1045-2 enthält Sieblinien für die Zuschlaggemische mit 8, 16, 32 und 63 mm Größtkorn. Die Zuschlaggemische mit 16 mm und 32 mm Größtkorn sind in den **Bildern II.2.5-1** und **II.2.5-2** dargestellt. Als Prüfsiebe werden bis zu einem Siebdurchgang von einschließlich 2 mm Maschensiebe nach DIN ISO 3310-1, oberhalb 2 mm Siebdurchgang Quadratlochsiebe nach DIN ISO 3310-2 verwendet. Zuschlaggemische mit Sieblinien unterhalb der Sieblinie A gelten als ungünstig, da sie grobkornreich sind und einen schwer verarbeitbaren, mit üblichen Geräten kaum verdichtbaren Beton ergeben, der außerdem stark zum Entmischen neigt. Der durch die Sieblinien A und B begrenzte Bereich der Kornzusammensetzung gilt als günstig. Allerdings sind in der Nähe der Sieblinie A liegende Zuschlaggemische immer noch sehr grobkornreich. Vom technischen Standpunkt aus sind Zuschlaggemische mit einer Sieblinie in der oberen Hälfte des durch die Sieblinien A und B

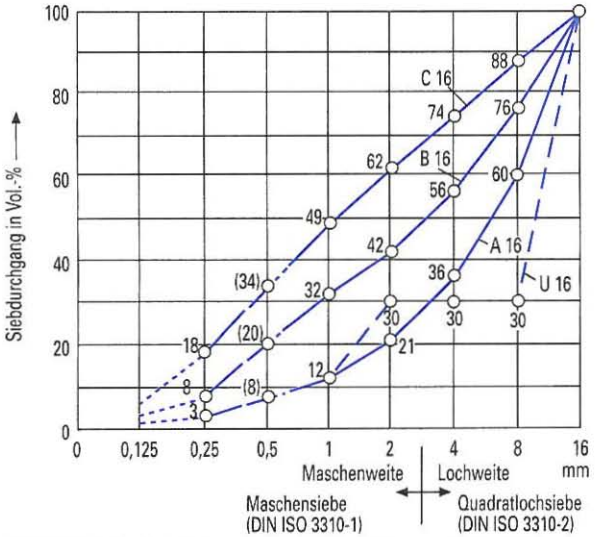


Bild II.2.5-1: Sieblinien für Betonzuschlaggemische 0/16 mm nach E DIN 1045-2 (Lochweiten im logarithmischen Maßstab)

begrenzten Bereichs optimal; sie müssen jedoch nicht das wirtschaftliche Optimum darstellen. Zuschlaggemische mit Sieblinien zwischen den Sieblinien B und C sind sandreich. Sie haben einen etwas höheren Wasseranspruch und erfordern dadurch für eine gegebene Konsistenz einen etwas höheren Leimgehalt als sandärmere Sieblinien oder den Zusatz eines Verflüssigers. Vor allem in sandreichen Gebieten können sie dennoch wirtschaftlich sein.

Ein Korngemisch mit unstetiger Sieblinie, z. B. U 16, bei dem eine oder mehrere Korngruppen fehlen, bezeichnet man als Aus-

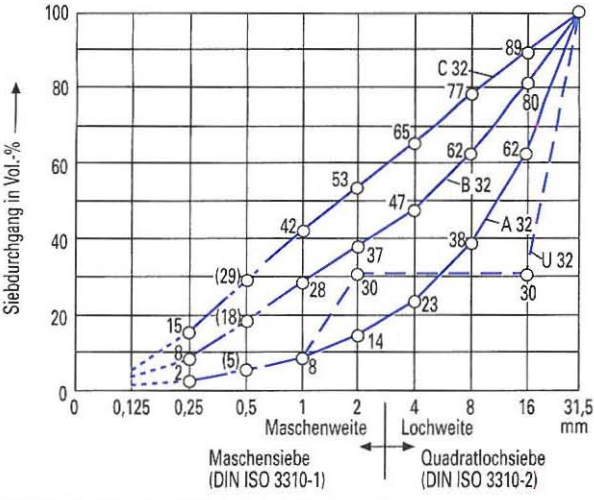


Bild II.2.5-2: Sieblinien für Betonzuschlaggemische 0/32 mm nach E DIN 1045-2 (Lochweiten im logarithmischen Maßstab)

fallkörnung. Es kann gegenüber einem Korngemisch mit stetiger Sieblinie einen geringeren Wasseranspruch und damit auch wirtschaftliche Vorteile haben. Betone mit Ausfallkörnung können vom üblichen Beton abweichende Frisch- und Festbetoneigenschaften haben.

Zur Beurteilung der Kornzusammensetzung eines Zuschlaggemisches, insbesondere seines Wasseranspruchs, kann man Kennwerte heranziehen, wie z. B. Körnungsziffer (k-Wert), Durchgangswerte (D-Summe), F-Wert (Hummel), spezifische Oberfläche oder Wasseranspruchszahlen [Hil1].

2.5.9 Wasseranspruch

Unter dem *Wasseranspruch* eines Zuschlaggemischs versteht man die auf den Kubikmeter Beton oder den Stoffraum des Zuschlags bezogene Wassermenge, die für einen Beton mit vorgegebener Konsistenz erforderlich ist. Der Wasseranspruch kann bei einiger Erfahrung anhand der Sieblinie oder der zuvor genannten Kennwerte abgeschätzt werden [Wes1].

2.6 Fasern

2.6.1 Definition

Fasern sind Stoffe, die im Vergleich zu ihren Querschnittsabmessungen eine große Länge aufweisen. Ihre wichtigste Eigenschaft ist ihre Zugfestigkeit.

2.6.2 Eigenschaften von Fasern in Beton und Mörtel

Kurzfasern werden als Zusatzstoff verwendet, um die Zugfestigkeit, die Zugbruchdehnung und das Arbeitsvermögen sowie die Schlagfestigkeit von Mörtel oder Beton zu erhöhen. Dafür müssen sie selbst eine möglichst hohe Zugfestigkeit und einen möglichst hohen E-Modul aufweisen. Sie müssen einen guten Verbund mit der Matrix eingehen und in der alkalischen Porenlösung des Zementsteins beständig sein. Als Werkstoffe werden z. B. *hochfester Stahl*, *alkaliresistentes Glas* oder *Kunststofffasern* (Polymerfasern) verwendet. *Kohlenstofffasern* kommen hier wegen ihres hohen Preises kaum in Betracht. Aus Gründen des Gesundheits- und Umweltschutzes dürfen *Asbestfasern* nicht mehr verwendet werden, obwohl sie in zementgebundenen Feinmörteln gute technische Eigenschaften aufweisen (hohe Zugfestigkeit, hoher E-Modul, hohe Verbundfestigkeit, hoher Widerstand gegen Feuchtigkeit, Alkalien, Säuren und gegen hohe Temperaturen).

reichenden Herabsetzung des pH-Werts, bei dem diese Fasern ausreichend dauerhaft sind.

Kunststofffasern können und müssen so ausgewählt werden, dass sie den auftretenden chemischen Einflüssen dauerhaft widerstehen.

2.6.3 Übereinstimmungsnachweis und Prüfungen

Fasern gehören zu den ungeregelten Bauprodukten. Sie bedürfen, damit sie in Deutschland in Bauteilen gemäß DIN 1045 oder anderen tragenden Bauteilen eingesetzt werden können, einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Darin werden der Umfang der werkseigenen Produktionskontrolle und der Fremdüberwachung festgelegt (s. Abschnitt II.17). Diese Maßnahmen sollen sicherstellen, dass Fasern gleich bleibender Form mit gleich bleibenden Eigenschaften geliefert und innerhalb empfohlener Mengenbegrenzungen eingesetzt werden.

Sollen die Festigkeitseigenschaften der Fasern statisch in Rechnung gestellt werden, so bedürfen die damit hergestellten Bauteile (Bauprodukte) einer gesonderten bauaufsichtlichen Zulassung oder der Zustimmung im Einzelfall der obersten Bauaufsichtsbehörde. Hierdurch soll erreicht werden, dass die nachgewiesene Wirkung der Fasern im Bauteil auch während einer Produktion erreicht wird, indem z. B. die gleich bleibende Fasermenge und –orientierung im Querschnitt nachgewiesen wird.

2.6.4 Lieferformen und Einmischen in Beton und Mörtel

Die Kurzfasern werden in der Regel bereits in der verarbeitbaren Form und Länge beim Hersteller des Faserbetons bzw. des Fasermörtels angeliefert. Der Hersteller hat die Aufgabe, die Fasern gleichmäßig im Frischmörtel bzw. Frischbeton zu verteilen, ohne dass sie zerstört werden oder sich zu „Igeln" zusam-

menballen. Dies kann durch Einmischen, erforderlichenfalls nach vorangehender Auflockerung, oder durch Einstreuen, z. B. während des Spritzens eines Mörtels, geschehen. Für Stahlfasern ist das Einmischen von Faserbündeln bekannt, aus denen sich die Fasern im Mörtel oder Beton vereinzeln, nachdem sich der verbindende Kleber aufgelöst hat.

Langfasern können in Mörtel und Beton nur verwendet werden, wenn sie zuvor zu Vliesen, Gelegen oder Geweben verarbeitet wurden, die gezielt in die zugbeanspruchten Bereiche eines Bauteils eingebaut werden, und zwar vor oder während des Einbringens des Frischmörtels bzw. des Frischbetons. Unter der Bezeichnung „textilbewehrter Mörtel und Beton" wird zz. ein neuer Anwendungsbereich für zementgebundene Baustoffe entwickelt [Cur4, Mes1, Mes2].

Um in Mörtel und Beton ausreichend wirksam werden zu können, muss die mittlere Länge der Fasern in der Regel größer sein als der dreifache Größtkorndurchmesser des jeweils verwendeten Zuschlags. Außerdem sollen die Fasern so lang sein, dass ihre Zugfestigkeit über einem Riss weitgehend ausgenutzt werden kann, bevor sie aus der Matrix herausgezogen werden. Zur Verbesserung des Verbunds können die Fasern spezielle Formen aufweisen. Die verwendbaren Faserlängen sind auch abhängig von der Stoffart; sie reichen von ca. 3 mm bis 100 mm, die Faserdurchmesser von ca. 20 nm bis 1 mm. **Tafel II.2.6-1** zeigt übliche Faserabmessungen aus verschiedenen Werkstoffen sowie Anhaltswerte für Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchverhalten.

Glasfasern und *Kunststofffasern* bestehen i. d. R aus einer großen Anzahl einzelner, sehr dünner Filamente, die aus Spinndüsen gezogen werden. Sie werden zu Fäden und Rovings gebündelt und bilden, auf Länge geschnitten, die praktisch einsetzbare „Kurzfaser". *Stahlfasern* können z. B. aus gezogenen Drähten mit dem gewünschten Querschnitt oder durch Fräsen oder Schälen hergestellt werden. Form und Querschnitt können so gestaltet sein, dass der Haftverbund mit der Matrix ein Optimum erreicht. Die wirksame Fasermenge wird in Vol.-% vom Mörtel oder Beton angegeben. Die Ausnutzung ihrer günstigen Eigenschaften im Mörtel- oder Betonquerschnitt hängt maßgeblich davon ab, ob die Fasern in Richtung der Hauptzugspannungen orientiert sind. Weiterführende Literatur siehe z. B. [Me21, Hil1, Mey1, Me14, Me6, Me29, Me30].

Die Dauerhaftigkeit der verschiedenen Fasern in Mörtel und Beton wird von den Eigenschaften der Porenlösung und von möglichen Umwelteinflüssen auf die ungerissene oder die gerissene Matrix bestimmt.

Tafel II.2.6-1: Eigenschaften ausgewählter Fasern (Anhaltswerte)

Stoff	Dichte kg/dm³	Durchmesser µm	Zugfestigkeit N/mm²	E-Modul N/mm² × 10³	Bruchdehnung ‰
Stahlfaser	7,8	100–1000	500–2600	210	5–35
Glasfaser					
E-Glas	2,6	8–15	2000–4000	75	20–35
AR-Glas	2,7	12–20	1500–3700	75	20–35
Kunststofffaser					
Polypropylen	0,9–1,0	20–200	450–700	4–12	60– 90
Polyacrylnitril	1,2	10–100	600–900	15–20	60–100
Kohlenstofffaser	1,9	9	2500	230	10
(Asbestfaser)	3,4	0,02–0,40	2000–3500	200	20–30

Stahlfasern sind durch die hohe Alkalität der Porenlösung vor Korrosion geschützt. Sie können, wenn ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff vorhanden sind, an der Oberfläche und im carbonatisierten Bereich korrodieren und hinterlassen dann ggf. Rostflecke. Eine Zerstörung der zementgebundenen Matrix – wie bei Bewehrungsstahl – ist damit nicht verbunden. Bei erwarteter Rissbildung der Matrix und damit verbundener Korrosionsgefahr haben sich Stahlfasern aus rostfreiem Stahl bewährt.

Glasfasern aus E-Glas sind in der alkalischen Porenlösung von Mörtel und Beton nicht ausreichend beständig. Deshalb wurden Glasfasern entwickelt, die einen erhöhten Alkaliwiderstand aufweisen. Wenn sie in dünnwandigen flächigen Bauteilen verarbeitet werden, führt die einsetzende Carbonatisierung zu einer hin-

3 Entwurfskriterien und Zusammensetzung

3.1 Variationsmöglichkeiten des 5-Stoff-Systems

Die Variationsmöglichkeiten des *5-Stoff-Systems* für den verarbeitungsfähigen „frischen" Mörtel und Beton sowie für den erhärteten Baustoff sind fast unbegrenzt. **Tafel II.3.1-1** vermittelt in Ergänzung zu Tafel II.1.1-1 einen Eindruck von der Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten der Betonausgangsstoffe für die Matrix und das Korngerüst, um die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der Bauausführung zu erfüllen. Maßgeblich für die Betonzusammensetzung sind i. d. R. nur wenige grundlegende Anforderungen. Die häufig sehr vielfältigen weiteren Anforderungen werden von entsprechend zusammengesetzten Betonen i. d. R. ohne weitere Nachweise erfüllt (s. Abschnitt II.3.4).

Da die oberflächliche Bearbeitung die einzig mögliche Veränderung am erhärteten Beton ist, müssen im Frischbeton alle Eigenschaften angelegt sein, die für die Herstellung, den Transport und die Verarbeitung erforderlich sind und die nach der Erhärtung unter planmäßigen Bedingungen zu den verlangten Gebrauchseigenschaften führen.

Deshalb ist es wichtig, dass der Bauausführende und der Betonhersteller alle notwendigen Planungs-, Bemessungs- und Konstruktionsannahmen sowie die damit verbundenen Anforderungen zur Kenntnis erhalten, um den Beton gezielt zusammensetzen, herstellen, transportieren und verarbeiten zu können. Umgekehrt ist es erforderlich, dass der Ausführende

Tafel II.3.1-1: Beton als 5-Stoff-System

Stoff	Beispiele für die Varianten
Zement	• Zementart, -festigkeitsklasse • Zementgehalt • besondere Eigenschaften
Zuschlag	• Rohdichte (normal, leicht, schwer) • natürlich, künstlich Sand, Kies Brechsand, Splitt • Kornaufbau, Sieblinie • besondere Eigenschaften
Wasser	• Begrenzung betonschädlicher Inhaltstoffe
Zusatzstoffe	• Flugasche, Trass, Silicastaub • Gesteinsmehl • Pigmente, Kunststoff (-dispersion) • Fasern (Stahl, Glas, Kunststoff)
Zusatzmittel	• BV, FM, LP, DM, VZ, BE, ST, CR, RH

erkennbar unzureichende, falsche oder unerfüllbare Anforderungen reklamiert, um eine plangerechte Ausführung sicherzustellen. In diesen Zusammenhang gehört z. B. auch, dass der Ausführungstakt und die damit verbundene Früh- und Endfestigkeit des Betons bereits während der Planung berücksichtigt werden.

Tafel II.3.1-2 nennt wesentliche *Frischbetoneigenschaften*, die ggf. für den Mischungsentwurf festgelegt und durch die Betonzusammensetzung erreicht werden müssen. Bei besonderen Herstell-, Transport- und Verarbeitungsverfahren können die Anforderungen an den Frischbeton sehr umfangreich sein.

Tafel II.3.1-2: Beispiele für Entwurfseigenschaften (Leistungsmerkmale) von Frischbeton

Verarbeitbarkeit (Konsistenz)*)
Verarbeitbarkeitszeit
Entmischungsneigung
– Wasserrückhaltevermögen (kein „Bluten")
– Absetzen von Feinmörtel
– Sedimentation des Grobzuschlags
– Aussondern von Grobkorn beim Verformen und beim Aufprall (Zusammenhaltevermögen)
Ansteifverhalten
Grünstandfestigkeit
Kapillarschwinden (Frühschwinden)

*) Klasseneinteilung nach E DIN 1045-2 (s. Tafeln II.1.1-2, II.3.2-1, II.4.2-1 und IV.3-4 bis IV.3-7)

Durch den Einsatz von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen ist es möglich, die erforderlichen Frischbetoneigenschaften fast unabhängig von den geforderten *Festbetoneigenschaften* zu erfüllen. **Tafel II.3.1-3** nennt eine Auswahl von Festbetoneigenschaften, die ggf. als Anforderung vom Planer und Konstrukteur und bei der Bauausführung berücksichtigt werden müssen.

Die maßgebenden *Entwurfseigenschaften* sind in E DIN 1045-1 und -2 als *Leistungsklassen* mit vorgegebener Bandbreite definiert (s. Tafel II.1.1-2 und Tafeln IV.3-1 bis IV.3-11). Die Zielgrößen für den Betonentwurf sind so zu wählen, dass die geforderten Mindest- und/oder Höchstwerte der jeweiligen Leistungsmerkmale mit ausreichender Sicherheit eingehalten werden können. Der Nachweis darüber ist in der Regel durch eine statistische Auswertung oder durch eine Einzelwertbetrachtung zu führen (s. Abschnitt II.17).

Tafel II.3.1-3: Beispiele für erforderliche Entwurfseigenschaften von Festbeton

Festigkeit (Einaxiale/mehraxiale Beanspruchung)

- Druckfestigkeit
  - Normalfester Beton*)
  - Hochfester Beton*)
  - Leichtbeton*)
- Zugfestigkeit (Biegezug, Spaltzug, zentr. Zug)
- Verbundfestigkeit
- Schlagzähigkeit und Bruchenergie

Verformungsverhalten

- lastabhängig
  - Elastizitätsmodul*)
  - Schubmodul
  - Bruchdehnung (Zug/Druck)
  - Kriechen
- lastunabhängig
  - Temperatur
  - Schwinden

Rohdichte

- Normalbeton
- Leichtbeton*)
- Schwerbeton

Dichtheit

- gegen Wasser, organische Flüssigkeiten, Gase

Dauerhaftigkeit unter Umwelteinwirkungen

Widerstand gegen

- Bewehrungskorrosion
  - Karbonatisierungswiderstand*)
  - Widerstand gegen Chloriddiffusion*)
  - Widerstand gegen Chloriddiffusion aus Meerwasser*)
- Betonkorrosion
  - Frostwiderstand ohne und mit Taumitteleinsatz*)
  - Widerstand gegen chemische Angriffe*) (Säuren, Sulfat)
  - Hydrolysewiderstand
  - Verschleißwiderstand*)
  - Vermeidung von Alkalizuschlagreaktion***)

Feuerwiderstand**)

Klasseneinteilung nach: *) E DIN 1045-2; **) DIN 4102; ***) DAfStb-Richtl.

bau des Zuschlags (siehe **Tafel II.3.2-2** und Abschn. II.4). Vollständig verdichtbare Konstruktionsbetone mit ausreichendem Zusammenhaltevermögen sollen ein Mindestleimvolumen von rd. 260 l/m³ besitzen. Durch ein höheres Leimvolumen mit gleichen rheologischen Eigenschaften lässt sich die Konsistenz kontinuierlich steigern. Ab einem Leimvolumen von rd. 280 l/m³ lässt sich die Konsistenz auch erfolgreich mit verflüssigenden Zusatzmitteln steigern. **Bild II.3.2-1** zeigt diesen Zusammen-

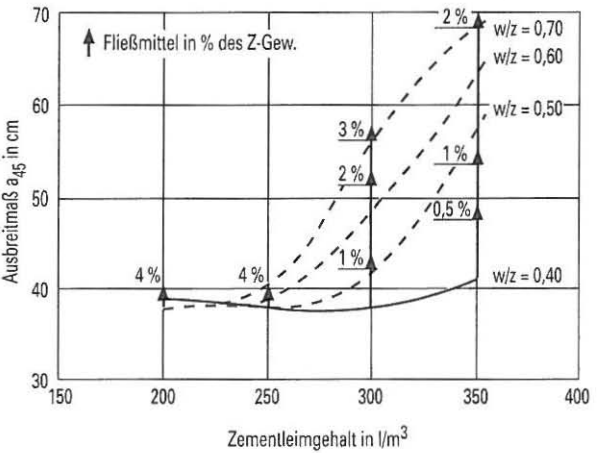


Bild II.3.2-1: Steigerung der Konsistenz von Konstruktionsbeton durch Erhöhung des Leimgehalts und Änderung der rheologischen Eigenschaften des Leims

a) durch Erhöhung des Wasserzementwerts

b) durch Verwendung von Zusatzmitteln (FM), ausgehend von w/z = 0,40 (Zement CEM I 32,5 R, Zuschlag AB16)

hang für Beton mit Zementleimen unterschiedlicher Wasserzementwerte. [Thi2]

Betone mit sehr steifer und mit steifer Konsistenz besitzen die für die Werkfertigung vieler Betonwaren erforderliche Grünstandfestigkeit. Voraussetzung dafür sind Leimgehalte < 250 l/m³ und niedrige Wasserzementwerte (w/z < 0,40), d. h. geringe Leimschichtdicken um die Zuschlagkörner und hohe Viskosität des Zementleims (s. Abschnitt II.11.1).

3.3 Entwurfsgrundlagen für Festbeton

3.3.1 Anforderungen

Die maßgebenden Anforderungen an den *Festbeton* ergeben sich aus Beanspruchungen durch Last und Zwang (direkte und indirekte Einwirkungen) sowie durch chemische und physikalische Beanspruchungen, die auf das herzustellende Bauwerk bzw. Bauteil einwirken.

Beispiele für häufig erforderliche Festbetoneigenschaften sind in Tafel II.3.1-3 angegeben. Sie setzen sich aus den Eigenschaften des Zementsteins bzw. der Matrix, den Eigenschaften des Korngerüsts (Zuschlags) und dem Verbund zwischen Matrix und Zuschlag (s. Tafel II.1.1-1) zusammen.

Einflussgrößen sind z. B.

- die physikalischen und chemischen Merkmale aller Ausgangsstoffe,
- die Volumenanteile der Ausgangsstoffe innerhalb der Matrix und des Korngerüsts,
- die Art und der Hydratationsgrad aller hydratationsfähigen Bestandteile,
- das Gefüge der erhärteten Matrix, ihre chemischen und physikalischen Merkmale sowie die Porenwasserzusammensetzung (s. auch Abschn. I.4.2).

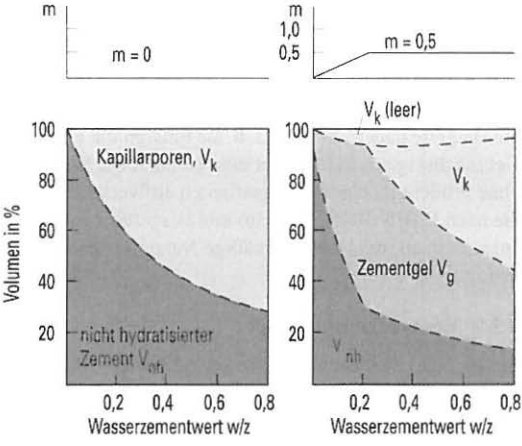
Die Tafeln IV.3-8 und -9 enthalten die Festigkeitsklassen für Normal- und Leichtbeton. Tafel IV.3-10 zeigt die Rohdichteklassen für Leichtbeton.

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben (s. Abschnitt II.1.1) müssen die Bauteile dauerhaft sein, d. h. sie müssen die erforderlichen Gebrauchseigenschaften über eine planmäßige Nutzungsdauer ohne größere Instandsetzungsarbeiten aufweisen. Für Bauteile, die nach E DIN 1045-2 geplant und ausgeführt werden, wird angenommen, dass die planmäßige Nutzungsdauer rd. 50 Jahre beträgt.

3.3.2 Wasserzementwert

Ein geringes Verhältnis von Wasser zu Zement (*Wasserzementwert* w/z) bzw. von Wasser zu Zement und zu den an der Hydratation beteiligten Zusatzstoffen (äquivalenter Wasserzementwert $w/z\,(eq) = w/(z + k_1 \cdot f + k_2 \cdot s)$ sowie ein hoher Hydratationsgrad vermindern das *Porenvolumen* innerhalb der Matrix. Ein geringes Kapillarporenvolumen erhöht die Festigkeit der Matrix und vermindert die *Durchlässigkeit*. Damit werden alle Gebrauchseigenschaften des Betons in Richtung auf eine höhere Leistungsfähigkeit verändert. **Bild II.3.3-1** [Hil1] zeigt die Volumen der *Kapillarporen*, des *Zementgels* und des nicht hydratisierten Zements in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und vom *Hydratationsgrad*. Der höchstmögliche Hydratationsgrad ist $m = 1$ bei $w/z \geq 0{,}40$. Die Bedeutung eines niedrigen Wasserzementwerts und eines hohen Hydratationsgrads (durch Nachbehandlung) für ein geringes Kapillarporenvolumen und damit für die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von Beton wird hieran besonders deutlich (s. Abschnitt II.7, II.9.6 und I.4.2).

Der weit reichende Einfluss des Wasserzementwerts auf die Festigkeit und Dichtheit des Zementsteins ermöglicht es, die Druckfestigkeit von Mörtel und Beton mit dichtem Normal-



zuschlag in Abhängigkeit von der *Normdruckfestigkeit* des Zements und vom Wasserzementwert anzugeben. Diese auch als „*Walz-Kurve*" bekannte Beziehung zeigt **Bild II.3.3-2** [Wal2, Wes2, Wes1]. Die Kurve wurde aufgrund von Prüfergebnissen des Forschungsinstituts der Zementindustrie für niedrige Wasserzementwerte ergänzt. Sie bezieht sich auf $f_{cmdr.\,cube}$, das ist die mittlere 28-Tage-Druckfestigkeit von Betonwürfeln mit 150 mm Kantenlänge, die gemäß DIN 1048 gelagert wurden.

3.3.3 Verformungen unter Last

Die lastabhängigen, elastischen Verformungen des Festbetons lassen sich durch die *Elastizitätsmoduln* von Zementstein und Zuschlag sowie durch ihre jeweiligen Volumenanteile steuern. Die Zuschlagkörner natürlicher Herkunft für normalfeste und hochfeste Betone weisen in der Regel eine höhere Festigkeit

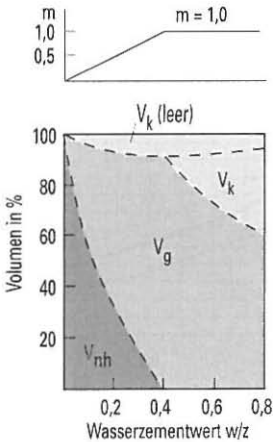


Bild II.3.3-1: Der Einfluss des Wasserzementwerts w/z und des Hydratationsgrads m auf die Volumenanteile des nicht hydratisierten Zements V_{nh}, des Zementgels V_g und der Kapillarporen V_k in Zementstein (konservierte Lagerung), nach [Hil1]

und einen höheren E-Modul auf als der Zementstein der Matrix (s. **Tafel II.3.3-1**). Daraus folgt, dass die Spannungstrajektorien unter Last gekrümmt verlaufen und im Verbundbereich zwischen Zuschlagkorn und Matrix Zugbeanspruchungen auftreten (**Bild II.3.3-3**) [Lus1]. Gerade hier ist das Gefüge des Zementsteins in der Regel jedoch über eine Tiefe von 10 bis 20 µm durch eine Anreicherung von Calciumhydroxid und eine erhöhte Porosität geschwächt (s. **Bild II.3.3-4**) [Reh1]. Infolge der Zugspannungen treten bei zunehmender Belastung zuerst in der Verbundzone Mikrorisse auf, die mit einer Spannungsumlagerung verbunden sind. Diese Umlagerung bewirkt das nicht lineare *Verformungsverhalten* des Betons unter Laststeigerung bis zum Bruch, das sich in Form eines abnehmenden „E-Moduls" darstellt (s. **Bild II.3.3-5**) [Sie1]. Der Elastizitätsmodul für Beton der Festigkeitsklasse C25/30 mit natürlichem Zuschlag (Sand, Kies) beträgt rd. 30 000 N/mm².

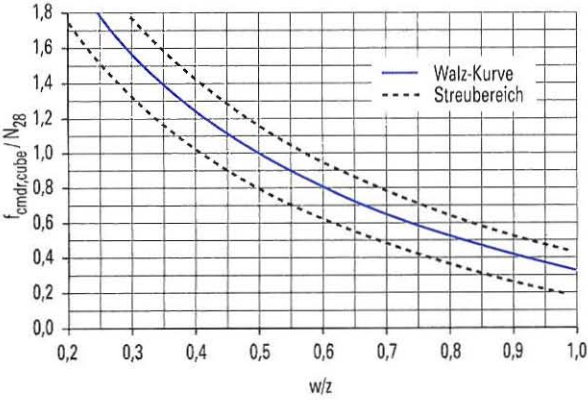


Bild II.3.3-2: Relative Druckfestigkeit von Beton in Bezug auf die Zementnormdruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (LP-Gehalt 1,5 Vol.-% in Anlehnung an die „Walz-Kurve" ist enthalten) [Wal2, Wes2, Wes1]

Tafel II.3.3-1: Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und E-Moduln von Zementstein, Zuschlag, Normalbeton und Leichtbeton sowie hochfestem Beton

Stoff	Druckfestigkeit in N/mm²	Zugfestigkeit in N/mm²	E-Modul in kN/mm²
Zementstein	35–70	4–15	5–20
Zuschlag	50–300	10–20	20–100
Leichtbeton	13–55	1–3,5	14–26
Normalbeton	15–55	1–5	20–40
hochfester Beton	65–115	4–6	40–45

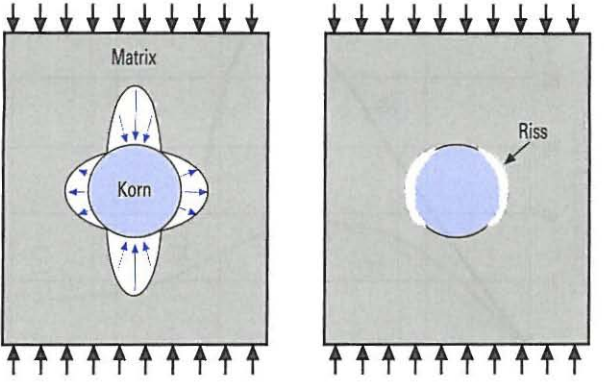


Bild II.3.3-3: Modell zur Spannungsverteilung und Rissbildung von druckbeanspruchtem Normalbeton

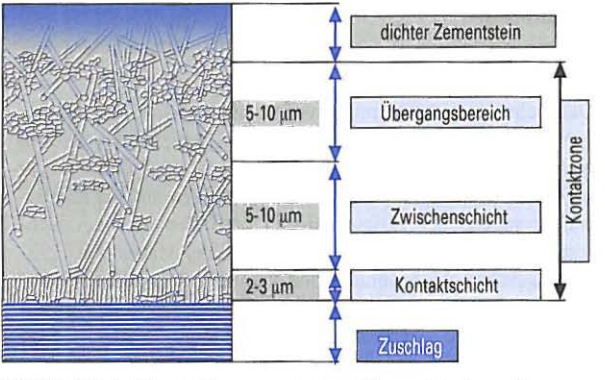


Bild II.3.3-4: Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag

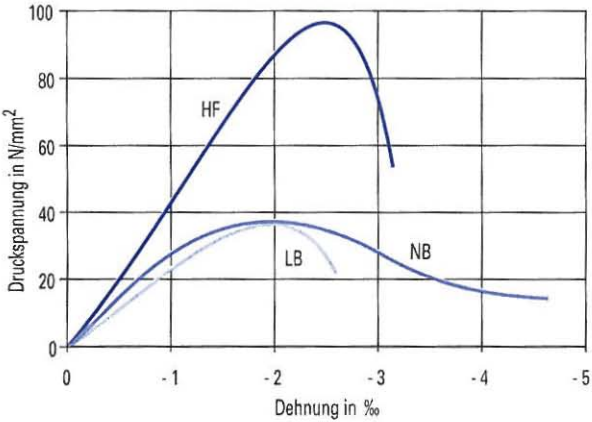


Bild II.3.3-5: Typische Verläufe für Spannungs-Dehnungs-Linien von normalfestem und hochfestem Beton sowie Leichtbeton

Das nicht lineare Verformungsverhalten ist umso geringer ausgeprägt, je höher die Matrixfestigkeit und je besser der Verbund zwischen Matrix und Zuschlag sind. Dies ist der Fall bei Leichtbeton wegen der geringeren Zuschlagfestigkeit und der rauen, wassersaugenden, reaktionsfähigen Oberfläche sowie bei hochfestem Beton wegen der hohen Festigkeit der Matrix und der ungeschwächten Kontaktzone, wenn reaktive silicatische Feinststoffe, wie z. B. Silicastaub, als Betonzusatzstoff verwendet werden. Alle Maßnahmen, die den Verbund zwischen Matrix und Zuschlag erhöhen, verbessern die Gebrauchseigenschaft des Festbetons, insbesondere Festigkeit und Dichtheit. Dazu dienen in erster Linie ein niedriger Wasserzementwert, eine raue

Kornoberfläche (Splitt) sowie ein besonders dichter und fester Zementstein in der Kontaktzone. Die Entwicklung von *Hochleistungsbetonen* beruht ebenfalls maßgeblich auf einer Gefügeverbesserung dieser Kontaktzone (s. Abschnitt II.5).

Wegen der wesentlich höheren Dichtheit des Gefüges von Hochleistungsbetonen unterscheiden sich diese in ihrem Gebrauchsverhalten von üblichen Betonen. Die praxiserprobten Entwurfsregeln können deshalb auf Beton mit Nennfestigkeiten von über 95 N/mm² nur bedingt übertragen werden, weshalb in jedem Einzelfall sorgfältige Untersuchungen zur Feststellung ausrei-

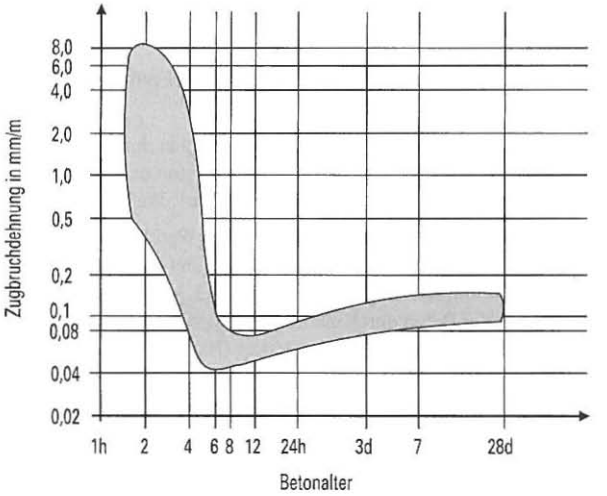


Bild II.3.3-6: Entwicklung der Zugbruchdehnung von Normalbeton vom plastischen bis zum erhärteten Zustand

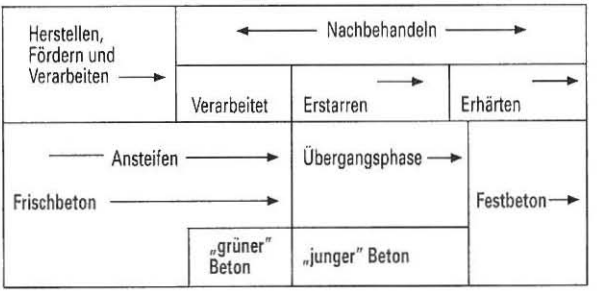


Bild II.3.3-7: Definition für „grünen" Beton und „jungen" Beton

chender Eignung für die Verarbeitung und das Festbetonverhalten notwendig sind.

Die *Zugbruchdehnungen* aller Festbetone liegen durchweg im Bereich von 0,1‰ bis 0,15‰, bei jungem Beton nach dem Erstarren noch niedriger (**Bild II.3.3-6**) [Wie1, Wei2, Hin1].

Als *„jungen" Beton* bezeichnet man Beton [Wei2], der sich im Übergangsstadium zwischen Erstarrungsbeginn und einem frühen Erhärtungszustand befindet (**Bild II.3.3-7**). In diesem Zustand ist der Beton durch ein hohes Verformungsvermögen unter Druckspannungen gekennzeichnet (**Bild II.3.3-8**) [Wie1, Gru1] und durch extrem geringe Zugbruchdehnungen (s. Bild II.3.3-6). Treten in dieser Übergangszeit, z. B. durch Austrocknung, Schalungsverformung oder Abkühlung, Zugbeanspruchungen auf, so weist der Beton einen äußerst geringen Widerstand gegen *Oberflächenrisse* und *Spaltrisse* auf. Deshalb muss die Nachbehandlungsdauer die Zeitspanne des jungen Betons voll überdecken (s. Bild II.3.3-7 und Abschnitte II.4.5 und II.9.6).

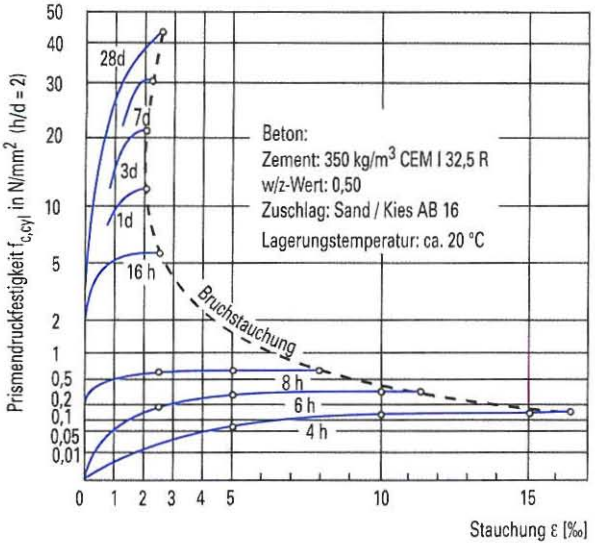


Bild II.3.3-8: Spannungs-Stauchungs-Linien in Abhängigkeit vom Alter des Betons nach Ergebnissen von Wierig [Wie1, Gru1]

Die last- und zeitabhängigen Verformungen des Festbetons bezeichnet man als *Kriechverformungen*. Sie müssen beim Betonentwurf zusätzlich zu den elastischen Verformungen berücksichtigt werden, um z. B. die Durchbiegung von Bauteilen oder Spannkraftverluste vorausberechnen zu können (s. Abschnitte II.6.1 und II.6.2).

3.3.4 Lastunabhängige Verformungen

Als lastunabhängige Verformungen müssen beim Entwurf die Verformungen durch Temperaturänderungen *(Temperaturverformungen)* und durch Änderungen des Feuchtehaushalts im Beton *(Schwinden und Quellen)* berücksichtigt werden. Sie dürfen insbesondere bei zwangbeanspruchten Bauteilen nicht vernachlässigt werden, weil sie das Risiko einer Rissbildung erhöhen können. Schwindverformungen können bei weit gespannten, gedrungenen Querschnitten auch erheblich zur Durchbiegung beitragen (s. Abschnitt II.6.3).

3.3.5 Dauerhaftigkeit

Die bezüglich ihrer *Dauerhaftigkeit* beeinflussbaren Festbetoneigenschaften (s. Tafel II.3.1-3) hängen im Wesentlichen von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und dem Gefüge des Zementsteins ab. Veränderungen der Dauerhaftigkeit werden verursacht durch *Transportvorgänge* in den *Kapillarporen* der Zementsteinmatrix und im Gefüge an den Kontaktzonen zwischen Matrix und Zuschlagkörnern (s. Abschnitt I.4.2). Infolge der Transportvorgänge kann es zu chemischen Reaktionen *(Carbonatisierung, Chlorideinbindung)* und zu mechanischen Beanspruchungen (Eisbildung durch Frosteinwirkung) kommen. Daneben können *lösende Angriffe (Säureangriff)* oder *treibende Angriffe* auftreten (*Sulfat-, Magnesiumtreiben*) (s. Abschnitt II.7).

Die Dauerhaftigkeit des Betons gegenüber bestimmten Beanspruchungen kann durch geeignete Prüfverfahren überprüft werden. Da diese aber nur in einem begrenzten Maße das Langzeitverhalten unter Praxisbedingungen nachbilden, werden in Normen und Regelwerken Grenzen für die zulässige Auswahl der Betonausgangsstoffe und für die Betonzusammensetzung in Abhängigkeit von den zu erwartenden Umwelteinwirkungen

getroffen. Die Umwelteinwirkungen werden dazu in Expositionsklassen eingeteilt (s. Abschnitt II.1 und Tafeln IV.3-1 bis -3). Die einzuhaltenden Regeln für die Betonzusammensetzung resultieren aus Laboruntersuchungen und den an Bauwerken gewonnenen Erfahrungen.

In dem Maße, wie die für die Beton- und Bewehrungskorrosion maßgeblichen Schädigungsverläufe bekannt sind und in ihrer Abhängigkeit von den relevanten Materialkennwerten dargestellt werden können, kann eine unmittelbare Dauerhaftigkeitsbemessung aufgrund der Betonzusammensetzung durchgeführt werden. Entsprechende Nachweiskonzepte werden derzeit entwickelt und an ausgewählten Sonderbauwerken erprobt. Weit entwickelte Konzepte über die für die Dauerhaftigkeit maßgeblichen Einwirkungen und Widerstände bestehen z. B. im Hinblick auf den *Säurewiderstand* und die *Hydrolyse* (s. Abschnitte II.7.3 und II.7.4), die *Carbonatisierung* (s. Abschnitt II.7.2) und die *Chlorideindringung* (s. Abschnitt II.7.2). Hingegen liegen für den möglichen Ablauf eines *Frost- und Frost-Tausalzangriffs* (s. Abschnitt II.7.1), eines Sulfatangriffs (s. Abschnitt II.7.3), eines Verschleißangriffs (s. Abschnitt II.7.5) oder einer *Alkali-Zuschlag-Reaktion* (s. Abschnitt II.7.6) noch keine ausreichenden Kenntnisse vor, um rechnerische Prognosen der Dauerhaftigkeit mit ausreichendem Bezug zur Praxis vornehmen zu können.

3.4 Grundlagen für die Zusammensetzung von Beton gemäß E DIN 1045 (Mischungsentwurf)

3.4.1 Zusammenstellung der Anforderungen

Der erste Schritt zur planmäßigen Herstellung von Beton gemäß E DIN 1045 besteht in der Zusammenstellung aller Anforderungen, die für die aktuelle Baumaßnahme bestehen.

Tafel II.3.4-1: Mindestanforderungen an übliche Konstruktionsbetone nach E DIN 1045-2

Anwendungsgebiete des Betons	Expositionsklasse	höchstzulässiger w/z-Wert[1)]	Mindestzementgehalt in kg/m³
Innenbauteile	XC1	0,75	240
bewehrte Fundamente ohne Frost	XC2		
Außenbauteile	XC4, XF1	0,60	280

[1)] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k · Zusatzstoff) – Wert) maßgebend.

Dazu gehören:

a) die Entwurfseigenschaften gemäß Tafel II.3.1-3, die aus den Planungs- und Konstruktionsunterlagen hervorgehen müssen. Hier können vor allem Anforderungen an die Festigkeitsklasse (Tafeln IV.3-8 und IV.3-9), an die Rohdichteklasse (Tafel IV.3-10), an die Festigkeitsentwicklung (Tafel IV.3-11), an die Dichtheit der Bauteile und an die Dauerhaftigkeit unter Umwelteinwirkungen (Tafeln IV.3-1 bis IV.3-3) gestellt werden. Aus der erforderlichen Betondeckung der Bewehrung können sich Anforderungen an das Größtkorn des Zuschlags ergeben. Auch an das Erscheinungsbild des Betons kann der Planer Anforderungen stellen, z. B. Sichtbeton und Oberflächengestaltung, die sich auf die erforderliche Betonzusammensetzung auswirken.

b) die Anforderungen, die sich aufgrund der o. g. Entwurfseigenschaften aus E DIN 1045-2 ergeben. Diese betreffen z. B. den höchstzulässigen w/z-Wert, die Zementart, den Mindestzementgehalt, den Mindestluftporengehalt und Anforderungen

Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	Mindestfestigkeits-klasse	Zement
240	C16/20	alle Zemente nach DIN 1164-1
270	C25/30	

an den Zuschlag, wie Frostwiderstand und Alkaliempfindlichkeit (s. Tafeln IV.3-15, IV.3-16 und IV.3-18, sowie an die Begrenzung des Mehlkorngehalts (s. Tafel IV.3-12, IV.3-13).

Tafel II.3.4-1 gibt auszugsweise die Mindestanforderungen an übliche Konstruktionsbetone nach E DIN 1045-2 wieder.

c) die Anforderungen, die sich ggf. aus den mitgeltenden Richtlinien des DAfStb ergeben:
- Restwasser [Ri5]
- Fließbeton [Ri4]
- verzögerter Beton [Ri3]
- Trockenbeton [Ri8]
- Alkalireaktion [Ri13]
- rezyklierter Zuschlag [Ri1]
- Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen [Ri2]

d) die spezifisch mit der Bauausführung verbundenen technischen Anforderungen, die der Bauausführende in Abhängigkeit z. B. vom Bauteil, vom Bauverfahren und von den Außentemperaturen an den Betonhersteller stellt. Dazu gehören vor allem

Anforderungen bezüglich der Konsistenzklasse bei Übergabe des Betons auf der Baustelle (Tafeln IV.3-4 bis IV.3-7) und an die Verarbeitbarkeitszeit des Frischbetons einschließlich Transportzeit (Tafel II.3.1-2) sowie ggf. Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung (Tafel IV.3-11). Weitere spezifische Anforderungen der Bauausführung ergeben sich z. B. aus besonderen Transport- oder Einbaubedingungen, wie für Pumpbeton, Unterwasserbeton oder langzeitverzögerten Beton. Auch wirtschaftliche Gesichtspunkte, wie Preis und Verfügbarkeit der in Frage kommenden Ausgangsstoffe, sind zu berücksichtigen.

3.4.2 Mischungsentwurf für die Erstprüfung (Eignungsprüfung)

Die systematische Auswertung der Anforderungen führt auf eine vorläufige Stoffauswahl für das 5-Stoff-System gemäß Tafel II.3.1-1, ggf. mit verschiedenen noch offenen Varianten. Auf dieser Basis wird die Betonzusammensetzung für die *Erstprüfungen* – bisher Eignungsprüfung genannt – entworfen.

Dabei kann man für *Normalbeton* folgendermaßen vorgehen [Bon1, Hil2, Web1]:

1) Die Anforderungen bezüglich Betondruckfestigkeit (Tafel II.3.1-3 und Bild II.3.3-2), Dauerhaftigkeit (Tafeln IV.3-15 und -16) und Zementfestigkeitsklasse ergeben einen ersten Ansatz für den höchsten zulässigen Wasserzementwert w/z. Ein Vorhaltemaß (Anhaltswert) $\Delta w/z$ von mindestens 0,03 hat sich bewährt, um Grenzwerte zuverlässig einhalten zu können.

2) Anforderungen an das Größtkorn, die Zuschlagsieblinie sowie an vorgesehene Zusatzstoffe (z. B. Mehlkorngehalt) und Zusatzmittel (z. B. Verflüssiger) sowie Luftporen führen, bezogen auf die gewünschte Konsistenz, zu einem Schätzwert für den erforderlichen wirksamen Wassergehalt w im Beton.

3) Den erforderlichen Zementgehalt erhält man aus z = w : (w/z). Er darf nicht kleiner sein als der Mindestzementgehalt, der sich z. B. aus den Dauerhaftigkeitsanforderungen gemäß Tafel IV.3-15 und IV.3-16 oder aus Vertragsbedingungen ergibt.

4) Die sog. Stoffraumgleichung

$$\frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{f}{\rho_f} + p = 1000\ [dm^3/m^3] \qquad [Gl\ II.3.4\text{-}1]$$

die die Volumenanteile von Zement, Zuschlag, Wasser, Zusatzstoffen und Verdichtungs- bzw. Luftporen für einen m^3 Beton aufsummiert, ermöglicht z. B. die Berechnung des Zuschlaganteils im Beton

$$g = (1000 - z/\rho_z - w/\rho_w - f/\rho_f - p) \cdot \rho_g\ [kg] \qquad [Gl\ II.3.4\text{-}2]$$

Darin bedeuten: z = Zementgehalt [kg/m^3]; w = wirksamer Wassergehalt [kg/m^3]; g = Zuschlaggehalt [kg/m^3]; f = Zusatzstoffgehalt [kg/m^3]; p = Porenraum [dm^3/m^3]; ρ_z = Rohdichte des Zements [kg/dm^3]; ρ_w = Dichte des Wassers [kg/dm^3]; ρ_g = Rohdichte des Zuschlags [kg/dm^3]; ρ_f = Rohdichte des Zusatzstoffs [kg/dm^3].

Die Angaben zu den Rohdichten sind in den Abschnitten II.2.1 (Zement), II.2.2 (Betonzusatzstoffe), II.2.4 (Betonzusatzmittel*) und II.2.5 (Betonzuschlag) sowie in Tafel IV.3-20 enthalten.

Zuschlagkorngruppen und Zusatzstoffe mit unterschiedlichen Rohdichten müssen nach Volumenanteilen in Gl. II.3.4-1 berücksichtigt werden. Die Rohdichte ρ_b des Betons in kg/dm^3 erhält man aus Gl. II.3.4-3

$$\rho_b = \frac{1}{1000}\ (z + w + g + f)\ [kg^3/dm^3] \qquad [Gl\ II.3.4\text{-}3]$$

*) Bei mehr als 3 l/m^3 ist der Wasseranteil beim w/z-Wert zu berücksichtigen.

5) Nachdem überprüft wurde, dass z. B. die Anforderungen an den zulässigen Mehlkorngehalt eingehalten sind (s. Tafel IV.3-12 und -13) kann die Mischanweisung aufgestellt werden. In der Mischanweisung ist der wirksame Wassergehalt in die Eigenfeuchte, die dem Zuschlag oberflächlich anhaftet, und das Zugabewasser aufzuteilen (s. Abschnitt II.2.3). Für alle Vorgänge von der Ermittlung der Zuschlagsieblinie über die Mischungsberechnung bis zur Mischanweisung wurden von den Fachverbänden zweckmäßige Vordrucke herausgegeben.

4 Frischbeton und Verarbeitung

4.1 Verarbeitbarkeit

Fertig gemischter, noch verarbeitbarer und verdichtbarer Beton wird als *Frischbeton* bezeichnet. Die Verarbeitbarkeit von Frischbeton ist keine direkt messbare physikalisch definierte Größe, sondern Sammelbegriff für rheologische Eigenschaften des Betons, wie z. B. Viskosität, Fließgrenze und innere Reibung, die das Verhalten des Frischbetons beim Mischen, Fördern, Einbringen und Verdichten beeinflussen. Damit der Frischbeton die geplanten Festbetoneigenschaften erreicht, muss er ein gutes Zusammenhaltevermögen aufweisen und so verarbeitbar sein, dass er ohne wesentliches Entmischen gefördert, eingebaut und praktisch vollständig verdichtet werden kann. Die Verarbeitbarkeit ist genauso wie die Druckfestigkeit eine maßgebende Betoneigenschaft und muss auf den jeweiligen Anwendungsfall, d. h. auf die Förderart, das Einbauverfahren, die Verdichtungsart sowie auf Bauteilabmessungen und Bewehrungsgrad abgestimmt werden. So kann z. B. ein steifer Massenbeton für das Betonieren eines Dammbauwerks hervorragend verarbeitbar, aber für feingliedrige Bauteile mit dichter Bewehrung völlig ungeeignet sein.

4.2 Konsistenz

Der Begriff *Konsistenz* dient in der Betontechnologie der quantitativen Beurteilung der Verarbeitbarkeit. Wie **Tafel II.4.2-1** und die Tafeln IV.3-4 bis -7 zeigen, unterscheidet der Entwurf von E DIN 1045-2 entsprechend der Prüfmethode (s. Ab-

Tafel II.4.2-1: Konsistenzbereiche, Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß-Klassen

Konsistenzbereich	Ausbreitmaß-Klassen[1]		Verdichtungsmaß-Klassen[1]	
	Klasse	Ausbreitmaß a in mm	Klasse	Verdichtungsmaß
sehr steif	–	–	C0	≥1,46
steif	F1	≤340	C1	1,45–1,26
plastisch	F2	350–410	C2	1,25–1,11
weich	F3	420–480	C3	1,10–1,04
sehr weich	F4	490–550	–	–
fließfähig	F5	560–620	–	–
sehr fließfähig	F6	≥630	–	–

[1] Die verschiedenen Konsistenzklassen sind nicht direkt aufeinander beziehbar [Bon6].

schnitt II.4.2.1) zwischen vier Konsistenzklassen, nämlich den Ausbreitmaß-, den Verdichtungsmaß-, den Setzmaß- und den Setzzeit-Klassen. Neben der Einteilung in Konsistenzklassen sind für die Ausbreitmaß- und die Verdichtungsmaß-Klassen Konsistenzbereiche angegeben. Dabei werden die Ausbreitklassen in die sechs Teilbereiche „steif", „plastisch", „weich", „sehr weich", „fließfähig" und „sehr fließfähig" unterteilt. Der in der bisherigen DIN 1045 als „fließfähig" bezeichnete Bereich wird in die Teilbereiche „sehr weich" und „fließfähig" unterteilt. Um Betone mit besonders großem Ausbreitmaß, wie z. B. selbstverdichtender Beton (s. Abschnitt II.4.6), in seiner Konsistenz definieren zu können, wird dieser Bereich noch um den Bereich „sehr fließfähig" erweitert. Beton mit sehr weicher

bzw. fließfähiger Konsistenz der Konsistenzklassen ≥F4, V4, ≥S4 darf nur mit Hilfe eines Fließmittels hergestellt werden (s. Abschnitt II.4.2.2).

Bei den Verdichtungsmaß-Klassen wird zwischen den Konsistenzbereichen „sehr steif", „steif", „plastisch" und „weich" unterschieden. In Ergänzung zu den früheren Regelungen werden dadurch auch sehr wasserarme steife Betone durch E DIN 1045-2 erfasst.

Bei der Bestellung von Beton ist die Konsistenzklasse und damit das Prüfverfahren oder in Ausnahmefällen ein Zielwert anzugeben. Als Messgröße für die Verarbeitbarkeit ist die Konsistenz zwar kein Maßstab für andere Betoneigenschaften, jedoch können Konsistenzänderungen Hinweise auf unplanmäßige Änderungen der Mischungszusammensetzung geben. In Verbindung mit der Frischbetonrohdichte bietet das Konsistenzmaß eine Beurteilungsgrundlage für die gleich bleibende Zusammensetzung des Frischbetons. Die Frischbetonkonsistenz ist vor Baubeginn in der Erstprüfung zu ermitteln und während der Herstellung durch Überwachungsprüfungen und während der Bauausführung ggfs. durch Abnahme- bzw. Kontrollprüfungen zu kontrollieren. Die Konsistenz des Betons muss zum Zeitpunkt, zu dem der Beton eingebaut wird, oder bei Transportbeton zum Zeitpunkt der Übergabe innerhalb der Grenzen der geplanten Konsistenzklasse liegen. Sie ergibt sich aus der Ausgangskonsistenz und dem Konsistenzverlust durch das Ansteifen bis zum Einbau bzw. zur Übergabe des Frischbetons.

4.2.1 Prüfung der Konsistenz

Zur Bestimmung der Konsistenz wurden zahlreiche praxisnahe Prüfverfahren entwickelt, die sich in der Anwendbarkeit, der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und dem Geräteaufwand unterscheiden und mit denen jeweils nur Teilbereiche der Frisch-

betonverarbeitbarkeit erfasst werden können. Fast alle arbeiten mit dem Einfluss der Schwerkraft, wirken aber unterschiedlich und messen somit jeweils andere Frischbetoneigenschaften. Während mit einigen Verfahren der Widerstand gegen Formänderung und somit ein Maß für die Verformbarkeit bestimmt wird, prüfen andere Verfahren, welcher Verdichtungsgrad bei vorgegebener Arbeit erreicht wird.

Physikalisch besser begründete Kennwerte könnte man z. B. durch rheologische Prüfungen an fließfähigen Betonen erhalten (s. Abschnitt II.4.2.2). Zurzeit existieren allerdings keine dazu tauglichen Verfahren, sodass die Konsistenz, geprüft durch die zugehörigen Konsistenzprüfverfahren, weiterhin als wichtigste Kenngröße für die Verarbeitbarkeit herangezogen wird.

Die Frischbetonkonsistenz soll gemäß E DIN 1045-2 vorzugsweise entweder mit dem *Ausbreitversuch* oder dem *Verdichtungsversuch* nach DIN 1048-1, kann aber auch mit dem *Setzversuch* (Slump-Test nach prEN 12350-2) oder dem *Setzeitversuch* (Vébé-Test nach prEN 12350-3) bzw. mit einem anderen vereinbarten Prüfverfahren ermittelt werden. Das *Ausbreitmaß* eignet sich besonders für Betone mit weicher bis fließfähiger Konsistenz. Der Verdichtungsversuch hingegen ist besonders für plastischen bis sehr steifen Beton, für Splittbeton und mehlkornreichen sowie für Leicht- und Schwerbeton geeignet. Die Ausbreit- und Verdichtungsmaße für ein und denselben Beton fallen nicht immer in den gleichen Konsistenzbereich nach Tafel II.4.2-1. Deshalb sind Vergleiche nur innerhalb eines Prüfverfahrens zuverlässig möglich [Bon6].

4.2.2 Konsistenzsteuerung

Das abgestimmte Gemisch aus Zuschlagkörnern im Beton erhält seine Beweglichkeit durch den aus Mehlkorn und Wasser bestehenden Leim. Die wesentlichen Kennwerte zur Steuerung von

Verarbeitbarkeit und Konsistenz des Betons sind die stoffliche Zusammensetzung des Leims, der Kornaufbau des Zuschlags sowie der Volumenanteil von Leim und Zuschlag im Stoffraum.

Zum Leim bzw. zur Mehlkornsuspension werden alle Feststoffpartikel mit einem Durchmesser von < 0,125 mm (Mehlkorn) gezählt. Abhängig von Kornform, Korngröße sowie der Oberflächenladung in der Suspension und von der chemischen Reaktivität beeinflusst das Mehlkorn die Verarbeitungsmerkmale des Leims. In wässriger Suspension weisen die einzelnen Partikel entsprechend ihrer stofflichen Zusammensetzung unterschiedliche Oberflächenladungen auf [Spa2]. Da gegensätzliche Ladungen einander anziehen, neigen die mineralischen Bestandteile der Suspension zur Agglomeration, und zwar unabhängig davon, ob es sich z. B. um eine reine Zementsuspension, um eine Zement-Flugasche-Silicastaub-Suspension oder um eine reine Flugaschesuspension handelt (s. **Bild II.4.2-1**).

Zur qualitativen und quantitativen Beschreibung der Verarbeitungsmerkmale des Leims dienen die rheologischen Kennwerte einer Suspension, d. h. deren Fließgrenze und deren dynamische Viskosität. Wie in [Spa2] anhand von Versuchsergebnissen dargestellt wird, verhalten sich diese Suspensionen rheologisch weitgehend wie Bingham-Körper (s. **Bild II.4.2-2**). Kennzeichen dafür sind eine ausgeprägte Fließgrenze, unter der sie sich wie feste Körper verhalten, und ein mit der Schergeschwindigkeit zunehmender Scherwiderstand, dessen Verlauf bei abnehmender Schergeschwindigkeit näherungsweise als geradlinig angenommen werden kann. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die dynamische Viskosität (tan α). Für hohe Wasser-/Feststoff-Verhältnisse in der Suspension geht die Fließgrenze wegen der großen mittleren Entfernung der Partikel gegen Null und die dynamische Viskosität nähert sich der von Wasser. Für

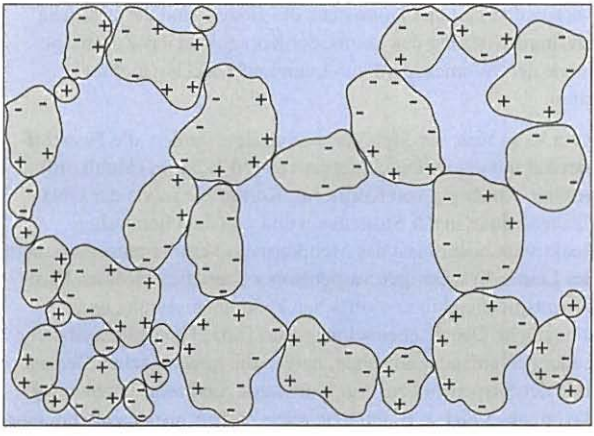


Bild II.4.2-1: Agglomeration im Beton aufgrund unterschiedlicher Oberflächenladungen

geringe Wasser/Feststoff-Verhältnisse steigt die Fließgrenze wegen der hohen Agglomerationsneigung stark an, ebenso die dynamische Viskosität. Die Fließgrenze und die dynamische *Viskosität* hängen somit im Wesentlichen von dem Wasser-/Feststoff-Verhältnis der Suspension ab, die Fließgrenze zusätzlich von den Oberflächenladungen der Feststoffpartikel.

Eine Erhöhung der Fließfähigkeit des Feinstoffleims wird durch Verringerung des aus Fließgrenze und dynamischer Viskosität resultierenden Scherwiderstands erreicht. Eine Wasserzugabe führt zu einer Vergrößerung der Partikelabstände untereinander und zur Verringerung des Scherwiderstands, indem die Fließgrenze und die dynamische Viskosität sinken. Gleichzeitig werden der Wasserzementwert und die Sedimentationsneigung

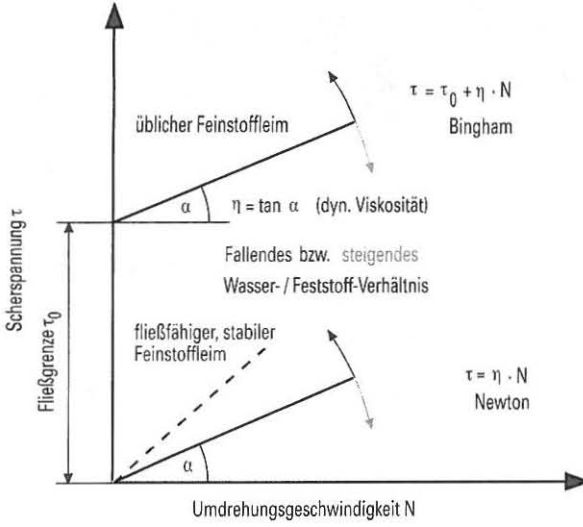


Bild II.4.2-2: Rheologisches Verhalten von Mehlkorn/ Wasser-Suspensionen; ohne Fließmittel (Bingham-Körper), mit Fließmittel (Newton-Flüssigkeit)

erhöht, wodurch die Dichtheit und Festigkeit des Zementsteins im Mörtel und Beton vermindert werden.

Die Wirkung einer Fließmittelzugabe besteht im Wesentlichen darin, die Oberflächenladungen (Zeta-Potential) an allen Feststoffpartikeln in der Dispersion anzugleichen und so die Partikel zu desagglomerieren (**Bild II.4.2-3**). Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Fließmittel, z. B. Polycarboxylate, zeigen, dass auch sterische und tribologische Effekte eine große Rolle für die Beweglichkeit der einzelnen Feststoffpartikel spielen [Oht1].

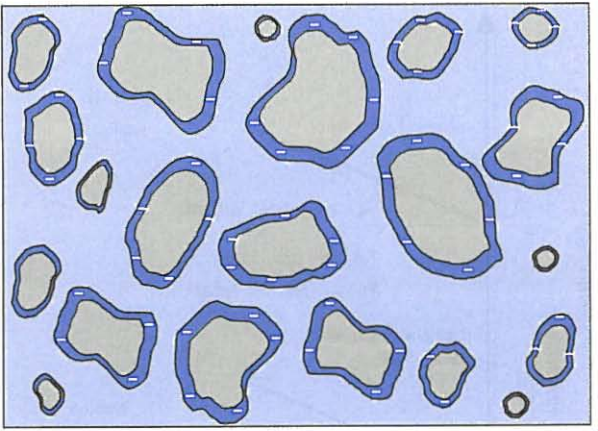


Bild II.4.2-3: Mehlkornsuspension mit Fließmittel, Desagglomeration durch Ausgleich der Oberflächenladungen

Stets ist mit zunehmender Fließmitteldosierung eine Verringerung des Scherwiderstands durch den Abbau der Fließgrenze gegen Null verbunden (Bild II.4.2-2 und **Bild II.4.2-4**), während die dynamische Viskosität der Suspension weitgehend von der Fließmittelzugabe unbeeinflusst bleibt und überwiegend vom Wasser/Feststoff-Verhältnis abhängt, d. h. von der mittleren Wasserschichtdicke zwischen den Feststoffpartikeln.

Bild II.4.2-4 zeigt auch, dass Fließmittel nur bis zu einer *Sättigungsgrenze* eine Verringerung des Scherwiderstands bewirken. Die Sättigungsgrenze ist erreicht, wenn der gemessene Scherwiderstand durch weiteren Zusatz von Fließmittel nicht weiter vermindert werden kann. Höhere Fließmittelzugaben verringern das Zusammenhaltevermögen des Leims und können genauso

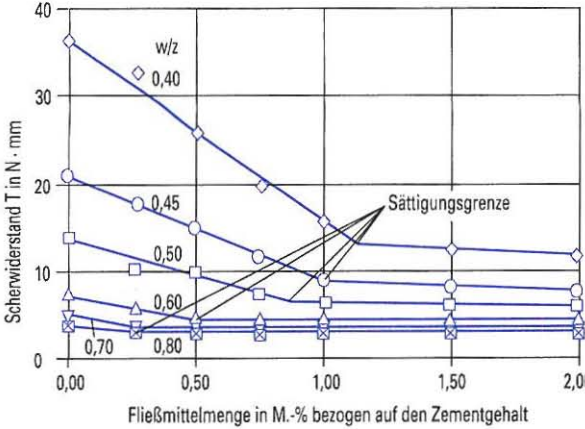


Bild II.4.2-4: Einfluss eines Fließmittels auf den Scherwiderstand von Zementleimen CEM I 32,5 R mit Wasserzementwerten von 0,40 bis 0,80

wie eine überhöhte Wasserzugabe das Sedimentieren von Feinstoffpartikeln zur Folge haben. Das Zusammenhaltevermögen eines Leims wächst mit größer werdender dynamischer Viskosität an, was durch eine Verringerung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses erzielt werden kann. Fließfähige, stabile Leime zeichnen sich somit durch eine geringe, gegen Null gehende Fließgrenze (Newton-Flüssigkeit) und eine hohe dynamische Viskosität aus, wie das in Bild II.4.2-2 durch die gestrichelte Linie angedeutet wird.

Der Volumenanteil des Leims im Stoffraum und der Scherwiderstand des Leims bestimmen die Konsistenz des Frischmörtels bzw. -betons. Das Ausbreitmaß kann nur dann merklich erhöht

werden, wenn der Leimgehalt im Beton höher ist als etwa 260 l/m³, was bei Konstruktionsbeton i. d. R. gegeben ist [Spa2]. Da der Wasserzementwert die Festigkeit und Dichtheit des Zementsteins bzw. des Betons vorbestimmt, lässt sich die Konsistenz des Frischbetons entweder durch Erhöhung des Leimgehalts mit dem jeweils erforderlichen Wasserzementwert oder durch Verringerung des Scherwiderstands dieses Leims mit Hilfe von Fließmitteln steuern. Bild II.3.2-1 zeigt diesen Zusammenhang.

Durch Wasserzugabe, die eine Erhöhung des Leimgehalts und eine Verrringerung des Scherwiderstands des Leims zur Folge hätte, könnte man zwar die Konsistenz eines Frischbetons steigern, dies jedoch nicht ohne Nachteile für alle Festbetoneigenschaften.

4.3 Frischbetonrohdichte und Luftgehalt

Die *Frischbetonrohdichte* ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen des verdichteten Frischbetons. Die theoretische Frischbetonrohdichte kann bei bekannter Mischungszusammensetzung aus der Rohdichte der Ausgangsstoffe einfach berechnet werden. Durch einen Vergleich mit der z. B. nach DIN 1048-1 im Luftporentopf experimentell bestimmten Frischbetonrohdichte erlaubt sie eine Kontrolle der Betonzusammensetzung und Verdichtung. Für vollständig verdichteten Frischbeton mit quarzitischem Zuschlag und günstiger Kornverteilung, einem Zementgehalt von rd. 300 kg/m³ und einem Wasserzementwert zwischen 0,5 und 0,6 beträgt die Frischbetonrohdichte ca. 2,35 bis 2,40 kg/dm³.

Auch praktisch vollständig verdichteter Frischbeton ohne luftporenbildende Zusatzmittel enthält in der Regel noch 1 bis 2 Vol.-% Luft, die so genannten Verdichtungsporen. Bei üblichen Betonen ist der *Luftgehalt* ein Maß für die Verdichtung. Bei Luftporenbeton, d. h. bei sachgerechtem Einsatz von luft-

porenbildenden Mitteln, ist er auch ein Maß dafür, ob wichtige Voraussetzungen für einen hohen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand des Beton erfüllt sind (s. Abschnitt II.7.1). Der Luftgehalt kann zuverlässig mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 1048-1 im Luftporentopf ermittelt werden. Da bei porösen Zuschlägen mit dem *Druckausgleichsverfahren* auch die Luft in den Zuschlagporen zusammengedrückt wird, empfiehlt sich bei Verwendung von Leichtzuschlag das Verfahren nach ASTM C 173.

4.4 Frischbetontemperatur

Die *Frischbetontemperatur* beeinflusst das Ansteifen und Erstarren und damit die Verarbeitbarkeit. Sie kann leicht aus der Masse, der Temperatur T und der Wärmekapazität c der einzelnen Betonkomponenten entsprechend Gleichung II.4.4-1 errechnet werden.

$$T_{b,fr} = \frac{z \cdot c_z \cdot T_z + g \cdot c_g \cdot T_g + w \cdot c_w \cdot T_w}{z \cdot c_z + g \cdot c_g + w \cdot c_w} \qquad \text{[Gl.II.4.4-1]}$$

Hierin bedeuten:

c_z = spez. Wärmekapazität des Zements in kJ/(kg · K)
c_g = spez. Wärmekapazität des Zuschlags in kJ/(kg · K)
c_w = spez. Wärmekapazität des Wassers in kJ/(kg · K)
z = Zementgehalt in kg je m^3 Beton
g = Zuschlaggehalt in kg je m^3 Beton
w = Wassergehalt in kg je m^3 Beton
T_z = Temperatur des Zements in °C
T_g = Temperatur des Zuschlags in °C
T_w = Temperatur des Wassers in °C
$T_{b,fr}$ = Temperatur des Frischbetons in °C

Die spezifische Wärmekapazität des Zements und des Zuschlags beträgt rd. 0,85 kJ/(kg · K), die von Wasser rd. 4,2 kJ/(kg · K).

Für einen Normalbeton mit rd. 300 kg Zement, rd. 1900 kg Zuschlag und rd. 170 kg Wasser je Kubikmeter Beton errechnet sich damit eine Temperaturänderung um rd. 1 K, wenn die Temperatur des Zements um rd. 10 K oder des Wassers um rd. 3,6 K oder des trockenen Zuschlags um rd. 1,6 K verändert wird.

Durch erhöhte Temperatur des Frischbetons steigt die Reaktivität des Klinkers und sinkt die Löslichkeit des erstarrungsregelnden Sulfatzusatzes. Erhöhte Frischbetontemperaturen führen deshalb im Allgemeinen zu schnellem Ansteifen und Erstarren, schlechterer Verarbeitbarkeit und höheren Frühfestigkeiten im Beton (s. Abschnitt II.5.2). Daher soll die Frischbetontemperatur selbst in der warmen Jahreszeit, vor allem beim Betonieren von massigen Bauteilen, möglichst gering sein, nach E DIN 1045-2 i. d. R. $\leq 30\,°C$. Die Temperatur darf höher liegen, wenn spezielle, auf diese Temperatur ausgerichtete Erstprüfungen vorliegen.

Durch eine niedrige Frischbetontemperatur wird das Ansteifen sowie das Erstarren und Erhärten verzögert. Um planmäßig zu erstarren und zu erhärten, muss der Frischbeton bei niedrigen Außentemperaturen, z. B. bei Frost, eine so hohe Ausgangstemperatur aufweisen, dass durch die eigene Wärmeentwicklung ein zu frühes Durchfrieren vermieden wird.

Die Frischbetontemperatur kann am einfachsten und auch am wirtschaftlichsten durch Erwärmen oder Abkühlen des Zugabewassers beeinflusst werden. Wird zum Erwärmen von Frischbeton heißes Zugabewasser verwendet, so bestehen im Allgemeinen keinerlei Bedenken bis zu Wassertemperaturen von rd. $+60\,°C$. Verwendet man Zugabewasser mit höheren Temperaturen oder Dampf (Dampfmischen s. Abschnitt II.9.1) empfiehlt es sich, den Zement erst nach dem Zugabewasser bzw. Dampf zuzugegeben, um unerwünschtes Ansteifen zu vermeiden.

Wenn die gewünschte Frischbetontemperatur allein durch Erwärmen bzw. Abkühlen des Zugabewassers nicht erreicht werden kann, müssen auch die Zuschläge erwärmt bzw. abgekühlt werden.

Für eine Senkung der Frischbetontemperatur im Sommer besteht die einfachste Maßnahme darin, den Zuschlag zu beschatten und kühles Zugabewasser zu verwenden. Darüber hinaus ist die Zugabe von Eis wegen dessen hoher Schmelzwärme besonders geeignet. Eine Zugabe von 8 kg Eis je Kubikmeter Beton senkt die Frischbetontemperatur um ca. 1 K [Wei1]. Eine weitere Möglichkeit ist die Einleitung von flüssigem Stickstoff über entsprechende Lanzen, z. B. in das Transportbetonfahrzeug unmittelbar vor der Übergabe auf der Baustelle [Utz1].

4.5 Übergang vom Frischbeton zum Festbeton

Die chemisch-mineralogische Reaktion des Zements (s. Abschnitt I.4.1) mit dem Zugabewasser, die Hydratation, bewirkt das *Ansteifen, Erstarren* und *Erhärten* von Beton. Der Übergang vom *Frischbeton* zum *Festbeton* geschieht nicht plötzlich, sondern umfasst verschiedene Stadien (s. **Bild II.4.5-1**) [1]. Der eingebaute und verdichtete, jedoch nur unwesentlich erstarrte Frischbeton wird als *„grüner" Beton* bezeichnet (s. Bild II.3.3-7). Für die Druckfestigkeit oder besser gesagt für die „Grünstandfestigkeit" des „grünen" Betons sind noch nicht die Hydratation des Zements, sondern die Fließgrenze und die Kapillarkräfte innerhalb des Leims verantwortlich. Mit fortschreitender Zementhydratation und somit zunehmendem Erstarren und Erhärten geht der „grüne" Beton in den „jungen" Beton über. „Grüner" und *„junger" Beton* kennzeichnen daher zwei zeitlich aufeinander folgende, nicht scharf abgrenzbare Phasen des Übergangs vom Frisch- zum Festbeton (s. Abschnitt II.3.3.3).

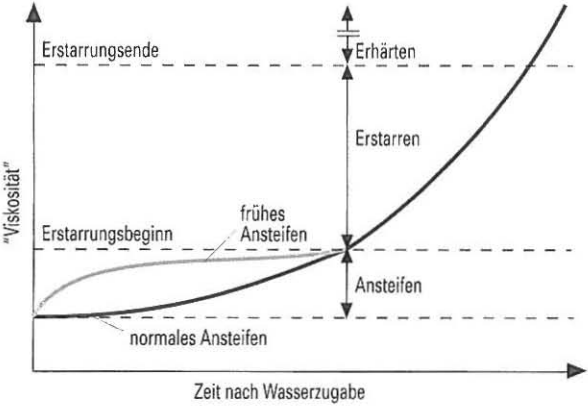


Bild II.4.5-1: Definition von Ansteifen, Erstarren, Erhärten von Zement und Beton

In der Praxis haben die Eigenschaften und das Verhalten von „grünem" Beton vor allem für die Herstellung von früh zu entformenden Betonwaren bzw. früh zu entschalenden Betonfertigteilen Bedeutung (s. Abschnitt II.11) [Wie1].

Durch die Hydratationswärme, durch Formänderungen der Schalung, schnelle Veränderung der Umgebungstemperatur und Wasserentzug sowie durch schnelles Austrocknen können Zwangspannungen im „grünen" und „jungen" Beton entstehen. Sobald die Zwangspannungen größer als die Zugfestigkeit des Betons werden, sind Risse unvermeidbar. Der Gefahr einer frühen Rissbildung muss vor allem durch Nachbehandlung (s. Abschnitt II.9.6) und durch Vermeidung einer zu frühen Überlastung begegnet werden [Wis5].

4.6 Selbstverdichtender Beton

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist dadurch gekennzeichnet, dass allein die Schwerkraft zum Entlüften und Fließen in dichtester Lagerung bis zum Niveauausgleich genügt. Mit SVB können selbst dicht bewehrte oder ungünstig geformte Bauteile ohne Rüttelverdichtung fehlerfrei erstellt werden.

In Japan wird seit einigen Jahren an selbstverdichtenden Betonen unter der Bezeichnung *"Selfcompacting Concrete" (SCC)* gearbeitet [Oka1, Oht1]. Die Technologie beruht darauf, dass selbstverdichtende Betone bei gleichem Wassergehalt wie normale Rüttelbetone wesentlich erhöhte Mehlkorngehalte aufweisen und dass hochwirksame Fließmittel das rheologische Verhalten der Mehlkornsuspension im Beton in Richtung einer Newton-Flüssigkeit („wie Honig") verändern (s. Bild II.4.2-2). Durch den geringen Wassergehalt der Mehlkornsuspension behält diese eine hohe dynamische Viskosität (tan α), sodass die gröberen Zuschlagkörner entmischungsfrei in der Suspension „schwimmen", ohne sich abzusetzen oder die Verformbarkeit der Suspension zu behindern (Bild II.4.2-2, gestrichelte Linie). Dabei ist es grundsätzlich gleichgültig, ob das Mehlkorn z. B. aus Zement, Flugasche, Metakaolin, Silicastaub oder inertem Gesteinsmehl besteht, sofern nur die Suspension im Zusammenwirken mit dem Fließmittel die erforderlichen rheologischen Eigenschaften aufweist.

Betone mit hohem Mehlkorngehalt, in denen neben dem erforderlichen Zementgehalt von z. B. 330 kg/m³ noch zementfeine Gesteinsmehle oder Flugaschen in ähnlicher Menge vorhanden sind, weisen selbst bei mittleren oder geringen w/z-Werten einen hohen Leimgehalt auf und erreichen bei entsprechender Fließmittelzugabe Konsistenzen, die „wie Honig" fließen.

Im **Bild II.4.6-1** ist die Zusammensetzung eines solchen „selbstverdichtenden Betons" (SVB) in Stoffraum- und Massenanteilen

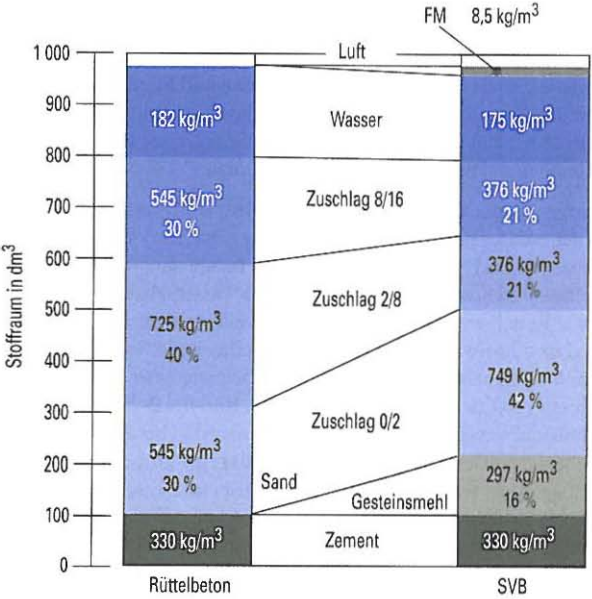


Bild II.4.6-1: Vergleich der Zusammensetzung eines Rüttelbetons und eines selbstverdichtenden Betons mit w/z ≈ 0,55

je m³ Beton im Vergleich zu einem normalen Rüttelbeton für Außenbauteile gemäß E DIN 1045-2 angegeben. Die Konsistenz des SVB kann so eingestellt werden, dass er keinerlei Entmischung zeigt, auf dem Ausbreittisch langsam, ohne einen einzigen Schlag, auf mehr als 70 cm (Richtwert) ausfließt (Slump flow-Test) (**Bild II.4.6-2**) und sich allein aufgrund statischen Drucks in einem U-förmigen Rohr ausnivelliert.

Bild II.4.6-2: Ausbreitmaß des SVB (rd. 70 cm ohne Schlag)

Erste Untersuchungen der Festbetoneigenschaften eines entsprechend Bild II.4.6-1 zusammengesetzten selbstverdichtenden Betons ergaben keine signifikanten Unterschiede gegenüber normalem Rüttelbeton mit gleichem Wasserzementwert bei Prüfung von Druck- und Biegezugfestigkeit, E-Modul, Frostwiderstand, Carbonatisierungswiderstand und Trocknungsschwinden (**Tafel II.4.6-1**). Untersuchungen zum *Frühschwind*verhalten *(Kapillarschwinden)* bestätigten eine höhere *Nachbehandlungsempfindlichkeit* des selbstverdichtenden Betons aufgrund der hohen Mehlkornanteile und der daraus resultierenden, schon bei geringem Wasserverlust im plastischen Beton auftretenden, hohen Kapillarspannungen [Gru2].

Neben Baustellenanwendungen, z. B. beim Millennium-Tower in Wien, lässt der Einsatz von SVB auf dem Gebiet der Betonfertigteilproduktion besondere Vorteile erkennen. Zusätzlich zu den technischen Vorteilen (keine Verdichtungsfehler, einwandfreier *Sichtbeton*) und den ökonomischen Vorteilen, die zur Senkung

Tafel II.4.6-1: Festbetoneigenschaften eines normalen Rüttelbetons und eines selbstverdichtenden Betons mit gleichem Wasserzementwert. Zusammensetzung entsprechend Bild II.4.6-1

Betoneigenschaft			Rüttelbeton	SVB
Druckfestigkeit	2d	N/mm²	17,8	22,3
	7d		28,5	31,6
	28d		39,0	39,5
Biegezugfestigkeit (28d)			4,6	4,4
statischer E-Modul (28d)			28150	28250
Schwindmaß ε_s (90d)		‰	−0,371	−0,414
Carbonatisierungstiefe d_c (90d)		mm	6	5
Masseverlust nach 100 FTW		M.-%	3,2	5,0
Nachbehandlungsempfindlichkeit		–	normal	hoch

der Arbeitskosten führen, rückt das vibrationsfreie und lärmarme Betonieren unter dem Gesichtspunkt des Arbeits- und Umweltschutzes immer mehr in den Vordergrund. Dem stehen aufgrund der zusätzlichen Mehlkorn- und Fließmittelmengen höhere Stoffkosten und besondere Anforderungen an die Schalung gegenüber.

Selbstverdichtender Beton geht bezüglich seines hohen Mehlkorngehalts und seiner Konsistenz über die Regelungen der DIN 1045 und der E DIN 1045-2 hinaus. Deshalb bedarf die Anwendung eines SVB in Deutschland derzeit noch einer bauaufsichtlichen Zulassung. Diese Erschwernis kann jedoch entfallen, sobald eine entsprechende Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton vorliegt und bauaufsichtlich eingeführt ist. Sie wird zz. erarbeitet.

5 Festigkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton

5.1 Festigkeit

5.1.1 Festigkeitsarten

Der Widerstand eines Körpers gegen verformende oder trennende mechanische Beanspruchungen wird als „Festigkeit" bezeichnet. Die Festigkeit ist die wichtigste Bemessungsgröße für Baustoffe in tragenden Bauteilen. Sie wird an Probekörpern in Kraft-Verformungs-Versuchen ermittelt, wobei die erzielte Höchstlast die Festigkeit definiert und i. d. R. in der Einheit N/mm^2 angegeben wird.

Die in **Tafel II.5.1-1** aufgeführten wesentlichen Festigkeitsarten werden zur Charakterisierung des Baustoffs Beton häufig benötigt und durch Prüfungen ermittelt. In den folgenden Abschnitten II.5.1.2 und II.5.1.3 werden die Prüfung und die Bedeutung der aufgelisteten Festigkeiten für den Baustoff Beton näher erläutert.

Neben der Art der Belastung hängt die Festigkeit auch von deren zeitlicher Entwicklung ab (**Tafel II.5.1-2**). Das übliche Belastungsspektrum für tragende Bauteile, das „unendlich oft" oder „unendlich lange" ertragen werden soll, besteht aus einem mittleren Belastungsniveau, zum Beispiel infolge Eigenlast, und aus wechselnden Beanspruchungen unterschiedlicher Größe, zum Beispiel infolge Verkehrs-, Schnee- oder Windlast. Da die wechselnden Beanspruchungen eines Bauteils in der Regel in unregelmäßiger Folge auftreten, spricht man von „Betriebsfestigkeit" eines Bauteils.

Tafel II.5.1-1: Festigkeitsarten zur Charakterisierung des Baustoffs Beton

Festigkeitsart	Probekörper
Druckfestigkeit	Würfel, Zylinder
zentrische Zugfestigkeit	Zylinder
Biegezugfestigkeit	Balken
Spaltzugfestigkeit	Zylinder, Würfel, Balken
Haftzugfestigkeit bzw. Abreißfestigkeit	kreisförmig freigebohrte Prüfflächen

Der Widerstand des Baustoffs nimmt in der Rangfolge *Kurzzeitfestigkeit, Dauerstandfestigkeit, Betriebsfestigkeit* ab. Die Bemessung von Betonbauteilen erfolgt nach E DIN 1045-1 auf der Basis der Betondruckfestigkeit (Kurzzeitdruckfestigkeit). Dauerstand- und Betriebsfestigkeit werden dabei für übliche Bemessungen durch entsprechend gewählte Bemessungswerte der Betondruckfestigkeit berücksichtigt.

Im Folgenden wird nur auf die kurzzeitige Druck- und Zugfestigkeit von Beton unter einaxialer Beanspruchung eingegangen. Angaben zur mehraxialen Festigkeit von Beton sind beispielsweise in [CEB1, Kup1, Sch9, Guo1, Dia1] zu finden. Der Einfluss von Dauerbelastungen, Wechselbelastungen sowie von hohen und niedrigen Temperaturen ist in [Hil1, Wes1] dargestellt.

5.1.2 Druckfestigkeit von Beton

Für die Beurteilung der Betonfestigkeit ist im Allgemeinen die *28-Tage-Druckfestigkeit* maßgebend. In besonderen Fällen kann

Tafel II.5.1-2: Festigkeitsarten von Beton in Abhängigkeit von der zeitlichen Entwicklung der Belastung

Festigkeitsart	Art der Belastung
Kurzzeitfestigkeit	einmalige kurzzeitige Belastung
Dauerstandfestigkeit	dauernde konstante Belastung
Dauerschwellfestigkeit	von Null auf einen Höchstwert ständig wechselnde Belastung
Dauerschwingfestigkeit	um einen Mittelwert schwingende Lastwechsel zwischen Ober- und Unterlast unter Druckbelastung

auch die Festigkeit im Alter von einigen Stunden oder Tagen *(Frühfestigkeit)* maßgeblich sein. Dies ist zum Beispiel der Fall bei der Festlegung von Terminen zum Aufbringen der Vorspannung oder zum Ausschalen bzw. Aufbringen früher Belastungen oder zur Abschätzung eines ausreichenden Frostwiderstands im jungen Alter (s. Abschnitt II.5.5). Für Sicherheitsbetrachtungen sowie für die nachträgliche Ermittlung der Betonfestigkeitsklasse, aber auch für Bauteile, für die eine bestimmte Festigkeit erst in späterem Alter gefordert wird, ist demgegenüber die *Nacherhärtung* bedeutsam (s. Abschnitt II.5.4.2).

Während die 28-Tage-Druckfestigkeit in der Regel an gesondert hergestellten Probekörpern mit normgemäßer Lagerung bestimmt wird, ist für den Nachweis der Frühfestigkeit der tatsächliche Erhärtungszustand des Betons im Bauteil zu ermitteln. Dies kann an gesondert hergestellten Probekörpern erfolgen, deren Lagerungstemperatur entsprechend der Bauwerkstemperatur gesteuert wird, oder durch zerstörende oder zerstörungsfreie Prüfungen am Bauwerk. Zu letzteren gehören zum Beispiel die

mechanische Prüfung mit dem Rückprallhammer oder die Ermittlung der Festigkeit in Abhängigkeit von dem am Bauteil gemessenen Temperaturverlauf (s. Abschnitt II.5.4.1).

In E DIN 1045-2 erfolgt die Einteilung der Betone in Festigkeitsklassen, denen die 28-Tage-Druckfestigkeit zugrunde liegen (s. Tafeln IV.3-8 und IV.3-9).

Die Druckfestigkeit f_c von Beton wird in der Regel an gesondert hergestellten Probekörpern bestimmt. Üblich sind Würfel von 150 mm Kantenlänge ($f_{c,cube}$) oder Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe ($f_{c,cyl}$), die nach in DIN 1048 genormtem Verfahren hergestellt und geprüft werden. Die Festigkeit bei Prüfung im Alter von 28 Tagen, d. h. das 5% Quantil nach statistischer Auswertung der Prüfergebnisse, wird als charakteristische Festigkeit f_{ck} bezeichnet.

Die im einachsialen Druckversuch ermittelte Festigkeit f_c wird berechnet nach

$$f_c = \max \sigma_D = \frac{\max F}{A} \qquad \text{[Gl.II.5.1-1]}$$

$\max \sigma_D$ = größte Druckspannung
$\max F$ = Höchstdruckkraft
A = Ausgangsquerschnitt

Das Versagen von Beton unter einachsialer Druckbeanspruchung wird durch Zugspannungen zwischen Matrix und Zuschlag verursacht (s. Abschnitt II.3). Das Maß einer Querdehungsbehinderung bei der Prüfung beeinflusst deshalb das Messergebnis, beispielsweise den Unterschied zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit.

Wenn nicht anders vereinbart, wird die Druckfestigkeit an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge $f_{cdr,cube}$ ermittelt, die nach dem nationalen Anhang zu prEN 12390-2 einen Tag in ihrer Form

verbleiben, sechs Tage wassergelagert und anschließend bis zum Prüftermin luftgelagert werden (bisherige Lagerung nach DIN 1048-5). Die Druckfestigkeit an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge $f_{c,cube}$, die entsprechend dem Referenzverfahren EN 12390-2 bis zum Prüftermin wassergelagert werden, kann aus der Druckfestigkeit $f_{cdr,cube}$ berechnet werden. Die Umrechnungsfaktoren sind von der Betonfestigkeitsklasse abhängig:

Normalbeton bis zur Festigkeitsklasse C55/67

$$f_{c,cube} = 0{,}92 \cdot f_{cdr,cube} \qquad \text{[Gl.II.5.1-2]}$$

Hochfester Normalbeton ab Festigkeitsklasse C60/75

$$f_{c,cube} = 0{,}95 \cdot f_{cdr,cube} \qquad \text{[Gl.II.5.1-3]}$$

Die Druckfestigkeit kann auch an 100 mm-Würfeln ermittelt werden. Der durch die Würfelabmessungen bedingte Unterschied der ermittelten Druckfestigkeit wird dabei mit Hilfe eines in E DIN 1045-2 enthaltenen Gestaltfaktors berücksichtigt.

$$f_{c,cube\,(150\,mm)} = 0{,}97 \cdot f_{c,cube\,(100\,mm)} \qquad \text{[Gl.II.5.1-4]}$$

Die Festigkeit im Bauwerk, die durch zerstörende Prüfverfahren nach DIN 1048-4 an Bohrkernen ermittelt wird, kann bis zu ca. 15% niedrigere Festigkeitswerte liefern als die an gesondert hergestellten Prüfkörpern bestimmte Festigkeit. Ursache dafür sind unter anderem die häufig geringere Verdichtung oder bei massigen Bauteilen die erhöhte Erhärtungstemperatur. Bei den aus Bauteilen entnommenen Prüfkörpern soll die geringste Prüfkörperabmessung das 3-fache des Zuschlaggrößtkorns nicht unterschreiten.

Durch zerstörungsfreie Prüfverfahren nach DIN 1048 Teil 2 und Teil 4 mit dem Rückprallhammer bzw. nach DIN ISO 8047 mit dem Ultraschallprüfgerät sind überschlägige Prüfungen der Bauwerkfestigkeit möglich. Diese Verfahren erlauben eine Erfassung der Festigkeitsänderungen und eine Abgrenzung verschiedener Betonbereiche im Bauwerk.

5.1.3 Zugfestigkeit von Beton

Das Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung kann entweder im *zentrischen Zugversuch* oder alternativ im Spaltzug- bzw. Biegezugversuch bestimmt werden. **Bild II.5.1-1** zeigt die Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit.

Die Festigkeit unter zentrischer Zugbeanspruchung f_{cc} wird berechnet nach

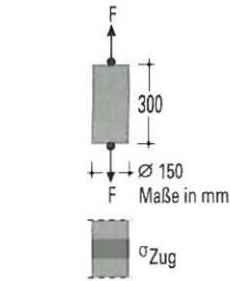
$$f_{cc} = \max \sigma_z = \frac{\max F}{A} \qquad \text{[Gl.II.5.1-5]}$$

$\max \sigma_z$ = größte Zugspannung
$\max F$ = Höchstzugkraft
A = Ausgangsquerschnitt

Für die Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit ist es zweckmäßig, den Querschnitt der Probekörper im mittleren Bereich zu verjüngen, um den Bruch in diesem Bereich zu erzwingen. In diesem Bereich kann von einem nahezu einachsigen Spannungszustand ausgegangen werden. Die zentrische Zugfestigkeit von Beton liegt etwa zwischen 1,5 und 4 N/mm².

Zur Ermittlung der *Spaltzugfestigkeit* f_{ct} werden Probekörper auf zwei gegenüberliegenden parallelen Linien ihrer Oberflächenbegrenzung bis zur Spaltung belastet. Dabei treten in Richtung der Lastebene Druck-, senkrecht dazu Zugspannungen, also ein zweiachsiger Spannungszustand auf. Die so ermittelte Spaltzugfestigkeit mit Werten zwischen 2 und 6 N/mm² [Hil1] liegt damit geringfügig über denen der zentrischen Zugfestigkeit.

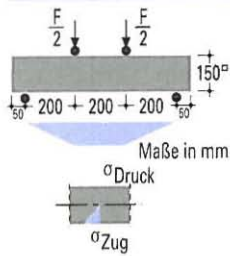
Die *Biegezugfestigkeit* f_{cf} ist die an Balken auf zwei Stützen bis zum Bruch erreichte Höchstbiegespannung, die in der Regel durch eine mittige Einzellast (3-Punkt-Biegeversuch) oder durch zwei symmetrische Einzellasten (4-Punkt-Biegeversuch) erzeugt wurde. Bei Beton mit einer gegenüber der Druckfestigkeit



Zentrische Zugfestigkeit

$$f_{cc} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

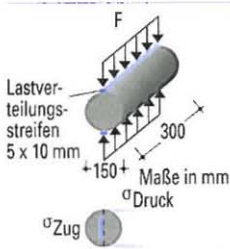
f_{cc}	Zugfestigkeit in N/mm²
F	Höchstlast in N
d	Durchmesser des Zylinders in mm



Biegezugfestigkeit

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

f_{cf}	Biegezugfestigkeit in N/mm²
F	Höchstlast in N
l	Stützweite des Balkens in mm
b	Breite des Balkens im Bruchquerschnitt in mm
h	Höhe des Balkens im Bruchquerschnitt in mm



Spaltzugfestigkeit

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l}$$

f_{ct}	Spaltzugfestigkeit in N/mm²
F	Höchstlast in N
d	Durchmesser des Zylinders in mm
l	Länge des Zylinders in mm

Bild II.5.1-1: Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit

wesentlich geringeren Zugfestigkeit tritt der Bruch durch Versagen der Zugzone ein. Die Biegezugfestigkeit ist ungefähr doppelt so groß wie die zentrische Zugfestigkeit. Die Biegezugfestigkeit üblicher Betone liegt etwa zwischen 3 und 8 N/mm² [Hil1] und ist maßgeblich für auf Biegezug beanspruchte, unbewehrte bzw. schwach bewehrte Betonbauteile, wie zum Beispiel Betonfahrbahnplatten, Estriche, Gehwegplatten.

Näherungsweise kann die mittlere Zugfestigkeit f_{ccm} nach E DIN 1045-1 aus der Druckfestigkeit berechnet werden:

$$f_{ccm} = 0{,}30 \cdot f_{ck}^{2/3} \qquad \text{[Gl.II.5.1-6]}$$

bis Festigkeitsklasse C50/60 und

$$f_{ccm} = 2{,}12 \cdot \ln(1 + (f_{ck} + 8)/10)) \qquad \text{[Gl.II.5.1-7]}$$

ab Festigkeitsklasse C55/67

5.2 Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung

Eine Zusammenstellung der Einflüsse auf die Betondruckfestigkeit zeigt **Bild II.5.2-1**.

Fast alle Festbetoneigenschaften werden von der Zusammensetzung der Matrix und dabei maßgebend vom Zementsteinporenraum, d. h. insbesondere vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad, bestimmt. **Bild II.5.2-2** zeigt beispielhaft den Einfluss des Wasserzementwerts auf die absolute und auf die relative *Festigkeitsentwicklung*. Ein niedrigerer Wasserzementwert führt nicht nur zu einer größeren Festigkeit nach 28 Tagen (Bild II.5.2-2 (a)), sondern auch zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung (Bild II.5.2-2 (b)) [Wis6, Mey2]. Die Druckfestigkeitsentwicklung wird weiterhin durch schnellere Hydratation beschleunigt. Der Hydratationsfortschritt steigt beispielsweise durch feinere Mahlung der Zemente, bei höherer Zementfestig-

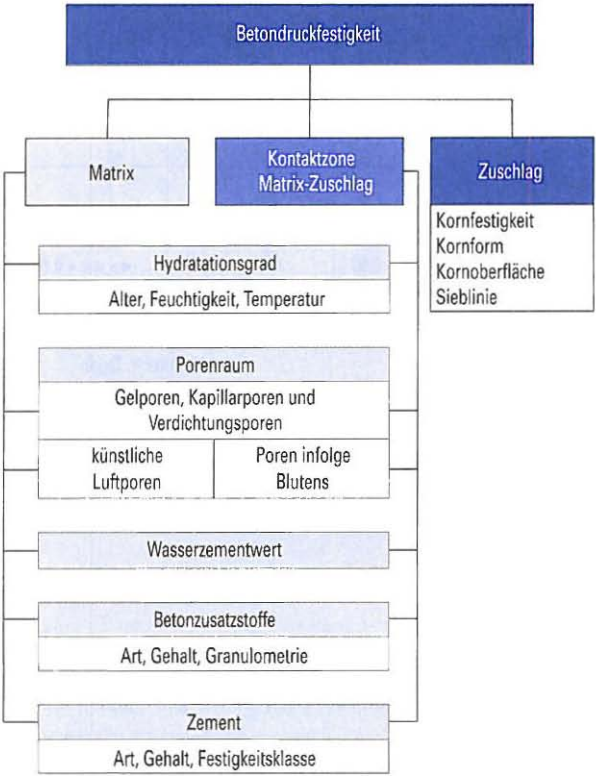


Bild II.5.2-1: Wesentliche Einflüsse auf die Betondruckfestigkeit

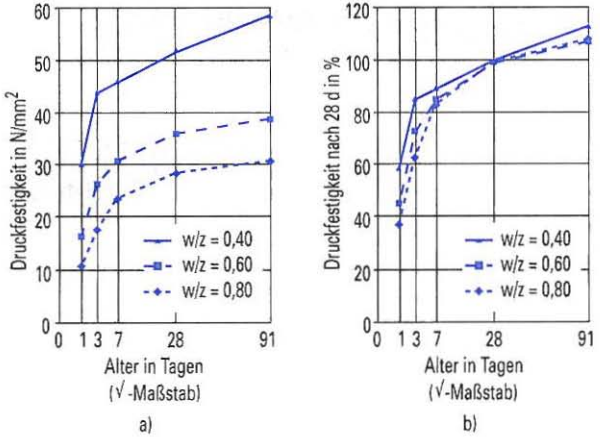


Bild II.5.2-2: Festigkeitsentwicklung von Betonen mit verschiedenen Wasserzementwerten (CEM I 32,5 R, Zementgehalt 200, 270 und 400 kg/m³) [Wis6]
a) Absolute Werte
b) Relative Werte (28 Tage entspricht 100% Druckfestigkeit)

keitsklasse, durch höhere Reaktivität der Betonzusatzstoffe und durch höhere Temperatur, zum Beispiel infolge Hydratationswärme.

Zu den übrigen Einflussgrößen auf die Betondruckfestigkeit nach Bild II.5.2-1, z. B. zum Einfluss des Zuschlags (s. Abschnitt II.3). Hinweise zum Porenraum sind in Abschnitt II.3.3 enthalten. Mit Poren infolge Blutens sind die Poren gemeint, die durch Wasserabsetzen unter groben Zuschlagkörnern entstehen können [Gru3].

5.3 Festigkeits- und Hydratationswärmeentwicklung

5.3.1 Temperaturverlauf infolge Hydratationswärme

Das Erhärten des Betons, das durch die Hydratation des Zements (s. Abschnitt I.4.1.3) verursacht wird, ist ein exothermer Vorgang. Gleichzeitig mit dem Erhärten wird Wärme freigesetzt, die zu einer *Temperaturerhöhung* im Bauteil führen kann. Erhöhte Temperatur hat eine beschleunigte *Frühfestigkeitsentwicklung* des Betons zur Folge, gleichgültig, ob sie durch einen Zement mit hoher Anfangsfestigkeit, einen erhöhten Zementgehalt, höhere Frischbeton- oder Umgebungstemperaturen oder durch einen langsamen Wärmeabfluss hervorgerufen wird.

Erhöhte Temperaturen im Bauteil während der Erhärtung haben auch entsprechende Temperaturverformungen zur Folge. Werden diese behindert, so treten Zwangspannungen auf (s. Abschnitt II.6).

Bei entsprechenden *Wärmeabflussbedingungen*, zum Beispiel in dünnen Bauteilen, kann die *Hydratationswärme* unmittelbar aus dem Beton abfließen, ohne einen spürbaren Temperaturanstieg im Beton zu verursachen. Je kleiner der Wärmeabfluss ist, umso größer ist der Temperaturanstieg. So entwickeln sich zum Beispiel in dickeren Betonbauteilen (s. Abschnitt II.10.4) oder bei wärmedämmender Schalung bzw. wärmedämmenden Abdeckungen vergleichbar höhere Bauteiltemperaturen im gleichen Beton.

Die unterschiedlichen Temperaturbedingungen, unter denen die Hydratation erfolgen kann, werden als *isotherme, adiabatische oder teiladiabatische Bedingungen* bezeichnet.

Bleibt die Temperatur konstant, liegen isotherme Bedingungen vor. Bei vollständiger Hydratation wird bei konstanter Lagerungstemperatur die Wärmemenge HW freigesetzt

Tafel II.5.3-1: Richtwerte für die Hydratationswärme von Zementen bestimmt mit dem Lösungskalorimeter nach EN196-8 (isotherme Lagerung, 20 °C)

Zement-festigkeits-klasse	Hydratationswärme in kJ/kg nach ... Tagen				HW_∞ in kJ/kg	
	1	3	7	28	Portland-zement	Portlandhütten- und Hoch-ofenzement
32,5	60...175	125...250	150...300	200...375	375...525	355...440
32,5 R/42,5	125...200	200...335	275...375	300...425		
42,5 R/52,5/ 52,5 R	200...275	300...350	325...375	375...425		

(s. Abschnitt I.4.1.3). Die Mittelwerte für HW_∞ von den am häufigsten in Konstruktionsbetonen eingesetzten Zementen, unterscheiden sich nur um ca. 20% voneinander [Hin1]. Im zeitlichen Verlauf der bei konstanter Lagerungstemperatur von 20 °C freigesetzten Hydratationswärmen unterscheiden sich jedoch die verschiedenen Zementarten und –festigkeitsklassen. Aus **Tafel II.5.3-1** geht hervor, dass rund 30 bis 50% der gesamten Wärme innerhalb des ersten Tages und rund 50 bis 75% in den ersten sieben Tagen freigesetzt wird. Zemente, die innerhalb der ersten sieben Tage in der Prüfung gemäß EN 196-8 weniger als 270 J/g Wärme entwickeln, werden nach DIN 1164-1 als Zemente mit niedriger Wärmeentwicklung (NW-Zemente) bezeichnet.

Solche isothermen Bedingungen können nur aufrecht erhalten werden, wenn eine Wärmemenge entsprechend der durch die Hydratation freigesetzten Wärme abgeführt wird. Wenn keine Wärme zwischen dem Bauteil und der Umgebung ausgetauscht wird, handelt es sich um adiabatische Temperaturbedingungen, wie sie in etwa im Kern einer Schwergewichtsstaumauer in den

ersten Stunden nach dem Betonieren vorherrschen. Eine vollständige adiabatische Temperaturerhöhung (s. Abschnitt II.5.3.2) im gesamten Bauteil ist in der Praxis nicht möglich, da während der Erwärmung bereits immer Wärme abfließt (**Bild II.5.3-1**).

Übliche Bauteilabmessungen führen dazu, dass die Hydratation des Zements weder unter isothermen noch unter adiabatischen Bedingungen abläuft. Der Vorgang ist dadurch gekennzeichnet, dass nur die schnelle Anfangsreaktion unter fast adiabatischen Verhältnissen abläuft [Hub1]. Das Temperaturmaximum wird erreicht, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen entstehender und abfließender Wärmemenge einstellt (**Bild II.5.3-2**). Der zeitliche Verlauf der *Hydratationswärmefreisetzung*, der im Labor bei isothermen oder adiabatischen Bedingungen ermittelt wird, stellt, bezogen auf die gleiche Starttemperatur von zum Beispiel 20 °C, für eine bestimmte Mörtel- oder Betonzusammensetzung einen definierten unteren und oberen Grenzverlauf dar [Hin1].

5.3.2 Adiabatische Bauteilbedingungen

Zur Vorhersage der *Temperaturerhöhung* ΔT_n nach t Tagen im Kern dickwandiger Bauteile (nahezu adiabatisch) eignen sich adiabatische Versuche. Die adiabatische Temperaturerhöhung im Bauwerk kann unter Berücksichtigung der adiabatisch bis zum untersuchten Zeitpunkt jeweils ermittelten *Hydratationswärme* des Zements $H_n(t)$ (in kJ/kg) näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\Delta T_n(t) = \frac{z \cdot H_n(t)}{Q_B} \text{ in K (Kelvin)} \qquad [Gl.II.5.3\text{-}1]$$

mit:

z = Zementgehalt in kg/m³

Q_B = Wärmekapazität des Betons in kJ/(kg · K) mit

$Q_B = \rho_B \cdot c_B$

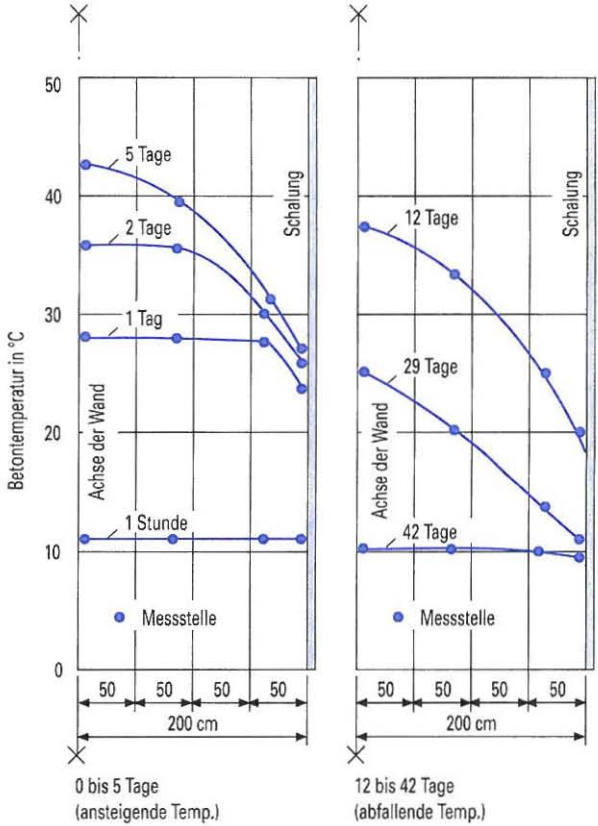


Bild II.5.3-1: Temperaturverlauf in einer 4 m dicken Wand bei Erwärmung infolge Hydratation und nachfolgender Abkühlung [Bas1]

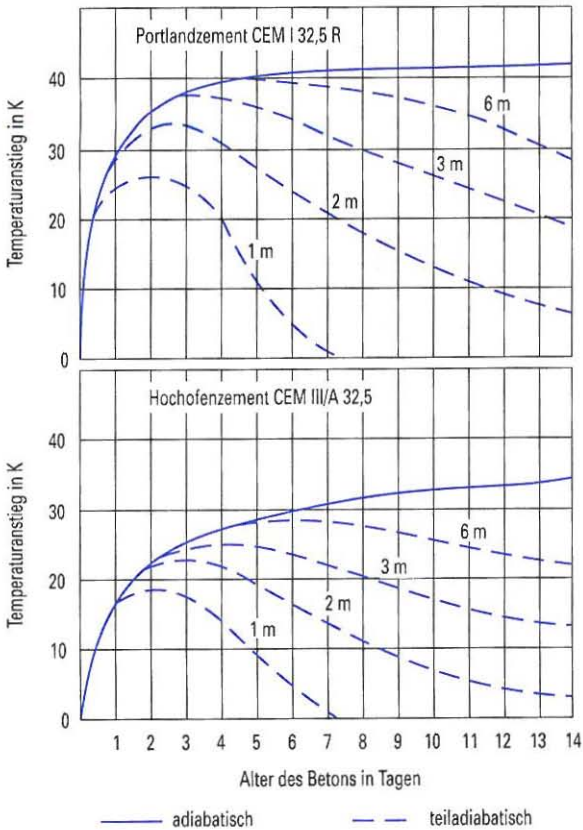


Bild II.5.3-2: Verlauf des Temperaturanstiegs infolge Hydratationswärme im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke. Beispiele für Betone mit 300 kg/m³ Zement [Bas1]

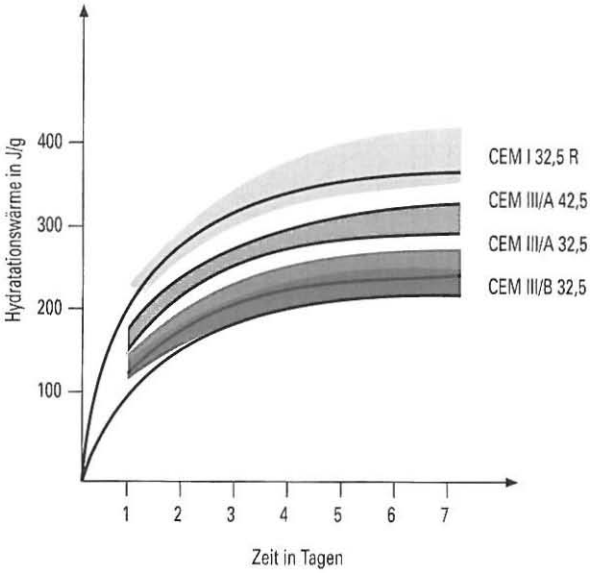


Bild II.5.3-3: Hydratationswärme H_n verschiedener Zemente unter adiabatischen Bedingungen [Vin1]

Für Normalbeton können näherungsweise für die Betonrohdichte $\rho_B = 2350\ kg/m^3$ und für die spezifische Wärmekapazität des Betons $c_B = 1{,}1\ kJ/(kg \cdot K)$ eingesetzt werden.

Für die Berechnung des anfänglichen Temperaturverlaufs im Bauwerk nach Gleichung II.5.3-1 sind die bis zum jeweiligen Zeitpunkt (t) adiabatisch gemessenen Werte für die Hydratationswärme $H_n(t)$ anzusetzen, die für verschiedene Zemente in **Bild II.5.3-3** dargestellt sind. Die adiabatisch bestimmten Werte

für die Hydratationswärme liegen über den unter konstanter Temperatur (isotherm bei 20 °C) nach Tafel II.5.3-1 ermittelten Werten. Für Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit beträgt nach sieben Tagen die unter isothermen Bedingungen ermittelte Hydratationswärme ca. 90% der adiabatisch bestimmten Wärme. Für Hochofenzemente mit niedriger Hydratationswärme liegt das Verhältnis bei etwa 75% [Eis1]. Für ein geringeres Alter oder bei tieferen Temperaturen sind die Unterschiede noch größer.

Der Zeitpunkt t_{maxT} bis zum Erreichen des Temperaturmaximums im Kern für Bauteildicken über 1 m kann mit der folgenden empirisch ermittelten Formel überschlägig berechnet werden [Wei1, Loh1, Bas1]:

$$t_{maxT} = 0{,}8\,d + 1 \text{ in Tagen,} \qquad \text{[Gl.II.5.3-2]}$$

wobei d für die Bauteildicke in m steht. Mit Hilfe der bis dahin freigesetzten Hydratationswärme kann die maximale Temperaturerhöhung im Bauteil abgeschätzt werden.

Zur Verminderung der Temperaturerhöhung hat sich für massige Bauteile der Einsatz von NW-Zementen bewährt, wenn die langsamere Festigkeitsentwicklung erwünscht ist (s. Abschnitt II.10.4) bzw. toleriert werden kann. Außerdem kann die Temperaturerhöhung durch einen möglichst geringen Zementgehalt und den Einsatz puzzolanischer Zusatzstoffe gemindert werden.

5.3.3 Teiladiabatische Bedingungen

Die rechnerische Ermittlung der Festigkeitsentwicklung unter teiladiabatischen Bedingungen in einem Bauteil erfordert mathematische Formulierungen, die den Einfluss der Betonzusammensetzung, der Ausgangstemperatur, der Wärmeabflussbedingungen (Bauteildicke, Schalung und wärmedämmende Ummantelung) sowie der Umgebungstemperatur auf die Hydratationswärmefreisetzung und damit auf den Temperatur-

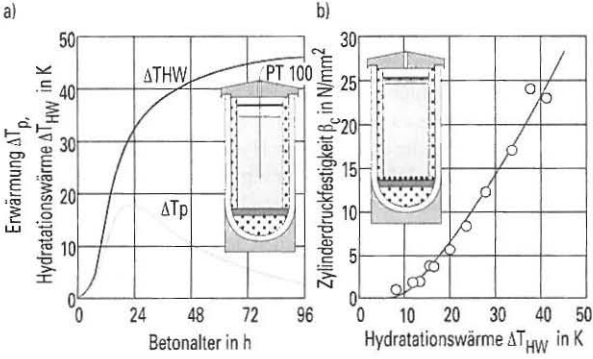


Bild II.5.3-4: Ergebnisse der experimentellen Bestimmung der Wärmefreisetzung und der Druckfestigkeitsentwicklung in einem Thermosflaschenversuch [Hin2]

verlauf berücksichtigen [Wei1]. Um die Übertragbarkeit solcher Modellrechnungen auf die Praxisverhältnisse zu verbessern, sind Erhärtungsprüfungen oft ein einfacher Weg, wenn sie näherungsweise die Bauteilbedingungen (Betonzusammensetzung, Frischbetontemperatur, Wärmeabflussverhältnisse) berücksichtigen. Hierfür eignen sich teiladiabatische Messsysteme [Me83], wie zum Beispiel solche mit einem handelsüblichen *Thermosgefäß* [Gru4]. Dabei teilt sich die freigesetzte Hydratationswärme in einen Anteil, der zur Temperaturerhöhung der Betonprobe führt, einen Anteil der je nach Dämmeigenschaften des Gefäßes in die Umgebung abfließt und einen Anteil der zur Erwärmung des Kalorimeters erforderlich ist (**Bild II.5.3-4 (a)**).

Durch eine Energiebilanz lässt sich aus der Erwärmungskurve der Betonprobe ΔT_P die zugrunde liegende Hydratationswärmefreisetzung als „Temperaturänderung" des Betons ΔT_{HW} berech-

nen. Ein solcher Hydratationswärmeverlauf gilt zunächst nur für den Temperaturgang der Messung, da die Hydratationsgeschwindigkeit temperaturabhängig ist. Diese Abhängigkeit kann über Reifefunktionen erfasst werden (s. Abschnitt II.5.4) [Hin2, Hin1, Gru4].

In den gleichen Gefäßen, die für die Wärmemessung eingesetzt werden, lassen sich auch zylindrische Prüfkörper für die Festigkeitsbestimmung lagern. Für unterschiedliche Temperaturgänge bei Variation der Frischbeton- und Umgebungstemperatur bzw. für unterschiedliche Prüfalter lassen sich frühe Druckfestigkeiten ermitteln. Bezogen auf die freigesetzte Hydratationswärme ΔT_{HW} erhält man eine weitere Kennlinie des jeweiligen Betons **(Bild II.5.3-4 (b))**. Es handelt sich dabei um eine praxisnah geprüfte *Festigkeits-Hydratationsgrad-Beziehung*. Mit dieser Kennlinie liegt ein objektives Kriterium vor, mit dem verschiedene Betone hinsichtlich einer Optimierung von Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung beurteilt werden können.

Im **Bild II.5.3-5** sind die Kennlinien für Betone, die jeweils mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden, dargestellt. Für Betone üblicher Zusammensetzung ist zum Erreichen einer angestrebten Festigkeit die erforderliche Wärmefreisetzung im Bereich von Wasserzementwerten zwischen 0,5 (hier nicht gezeigt) und 0,6 nahezu unabhängig vom eingesetzten Zement [Hin1, Hin2]. Der dargestellte Zusammenhang zeigt, dass schon relativ geringe Festigkeiten eine erhebliche Wärmefreisetzung bedingen. Beispielsweise wird für eine Druckfestigkeit von lediglich 5 bis 7 N/mm² eine Hydratationswärme benötigt, die einer rechnerischen Temperaturerhöhung ΔT_{HW} von rd. 20 K entspricht. Diese Wärmefreisetzung wird von den verschieden zusammengesetzten Betonen in Abhängigkeit zum Beispiel von Zementart und -festigkeitsklasse, Wasserzementwert und der Frischbetontemperatur in sehr unterschiedlichen Altern erreicht.

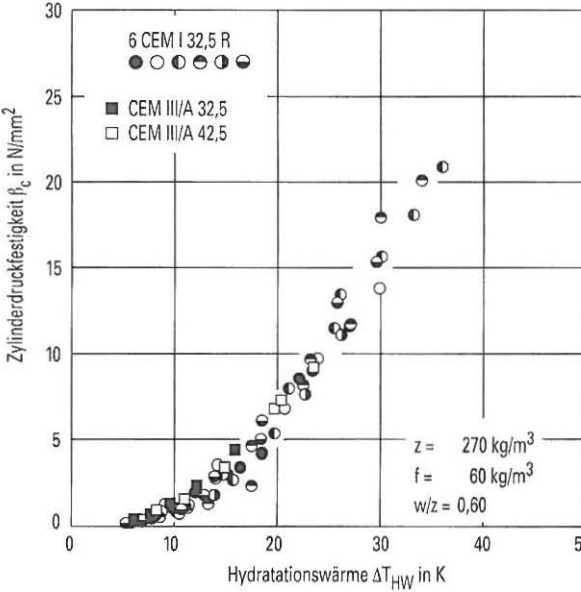


Bild II.5.3-5: Zylinderdruckfestigkeit nach Lagerung im Thermosgefäß (Zuschlag Rheinkiessand, Sieblinie A16/B16) [Hin2]

5.3.4 Einfluss der Frischbeton- bzw. Umgebungstemperatur auf die Festigkeitsentwicklung

Je höher die Frischbetontemperatur ist, umso schneller wird infolge der rascher ablaufenden Hydratation Wärme freigesetzt. Entsprechend schneller steigt die Frühfestigkeit und entsprechend höher wächst die Temperatur im Betonbauteil an. Bei

niedrigeren Frischbetontemperaturen steigt die Frühfestigkeit langsamer und die Temperatur bleibt im Bauteil niedriger. Zur Steigerung der Frühfestigkeit stehen somit folgende Maßnahmen zur Verfügung: Eine Betonzusammensetzung mit hoher Frühfestigkeit durch entsprechende Wahl von Zement, Wasserzementwert und Zusatzmittel, eine erhöhte Temperatur des Frischbetons sowie eine *Wärmebehandlung* des verdichteten Betons. Diese Maßnahmen lassen sich teilweise miteinander kombinieren.

Frischbetontemperaturen oberhalb 20 °C beschleunigen die Festigkeitsentwicklung erheblich (**Bild II.5.3-6**). Im Alter von zwölf Stunden wird zum Beispiel bei gleichen Wärmeabfließbedingungen die Festigkeit bei einer Frischbetontemperatur von 25 °C im Vergleich zu einer Frischbetontemperatur von 20 °C fast verdoppelt bzw. eine Festigkeit von zum Beispiel 4 N/mm² zwei bis drei Stunden früher erreicht. Bei niedrigen Frischbetontemperaturen wird die Festigkeitsentwicklung deutlich verzögert, und zwar um ca. drei Stunden je 5 Grad Temperatursenkung. Ein Beton, der mit einem vergleichbar schnell erhärtenden Zement CEM I 32,5 R hergestellt wurde, braucht zum Beispiel eine Frischbetontemperatur von wenigstens 15 °C, um nach zwölf Stunden eine Festigkeit von 4 N/mm² sicher zu erreichen. Bei noch niedrigeren Temperaturen müsste entweder der Wasserzementwert nennenswert gesenkt werden oder ein deutlich schneller erhärtender Zement eingesetzt werden. Wird in einem Beton mit demselben Zement ein Teil des Zements durch Flugasche ausgetauscht (Bild II.5.3-6) wird eine Festigkeit von 4 N/mm² nach zwölf Stunden nur sicher erreicht, wenn die Frischbetontemperatur wenigstens 25 °C beträgt. Die in den Bildern II.5.3-5 und II.5.3-6 für die Zemente 32,5 R dargestellten Zusammenhänge gelten in ähnlicher Weise auch für Zemente der Zementfestigkeitsklasse 42,5 [Hin2].

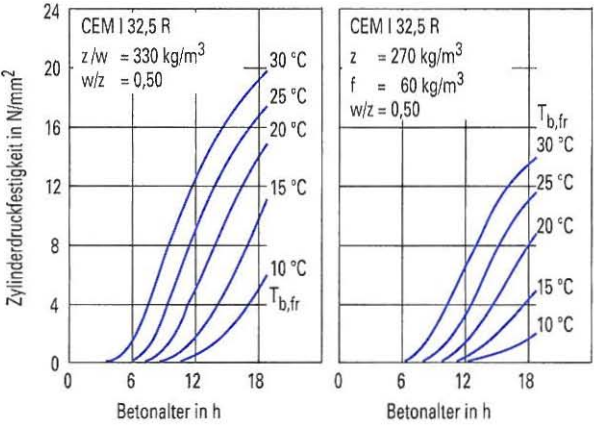


Bild II.5.3-6 Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für zwei Betone in einem Bauteil mit 0,6 m Dicke in Stahlschalung [Hin2]

Zur Steigerung der Frischbetontemperatur gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Entweder das Vorwärmen einzelner Ausgangsstoffe oder das Einmischen von Dampf während des Mischvorgangs, was als *Dampfmischen* bezeichnet wird. Dabei ist [Me2] zu beachten (s. Abschnitt II.4.4 und II.9). Ist die Temperatur der Ausgangsstoffe verschieden hoch und wird von außen keine Wärme zu- oder abgeführt, so lässt sich die Frischbetontemperatur näherungsweise wie in Abschnitt II.4.4 entsprechend Gl. II.4.4-1 angegeben berechnen.

Die *Wärmebehandlung* des Betons (s. Abschnitt II.11.2) ist das am weitesten verbreitete Verfahren zur Erhöhung der Frühfestigkeit und ist in Betonwerken ein erprobtes Verfahren, um mög-

lichst frühzeitig entformen zu können oder bei Spannbetonbauteilen ein frühzeitiges Vorspannen zu ermöglichen. Hierbei ist die DAfStb-Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton [Ri17] zu beachten.

5.4 Alters- und temperaturabhängiger Verlauf der Druckfestigkeit

5.4.1 Reife des Betons

Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit ist für jeden Beton hauptsächlich von der Zusammensetzung und den Lagerungsbedingungen abhängig. Für die Ermittlung der altersabhängigen Druckfestigkeit können empirische Rechenansätze, z. B. entsprechend dem CEB-FIP Model Code 1990 bzw. [Wes1] angewendet werden, die einerseits die Betonzusammensetzung und andererseits den Temperatureinfluss über das *wirksame Alter* berücksichtigen.

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturverläufe auf die Festigkeitsentwicklung eines bestimmten Betons lässt sich quantitativ anhand der *Reife* abschätzen. Sie ist ein Maß für den Erhärtungszustand zu einem bestimmten Betonalter in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer und dem dazugehörigen Temperaturverlauf. Sie ist so definiert, dass ein unter verschiedenen Temperaturverläufen erhärtender Beton gleicher Zusammensetzung die gleiche Druckfestigkeit erreicht, wenn er die gleiche Reife hat.

Die einfachste Beziehung für die Bestimmung der Reife ist die Formel nach Saul (**Tafel II.5.4-1**). Diese Beziehung lässt allerdings unberücksichtigt, dass die Reife bei höherer Temperatur überproportial zunehmen müsste und dass dieser Einfluss auch noch von der Zementart abhängt. Diese Einflüsse können durch die Arrehnius-Funktion mit entsprechend gewählter

Tafel II.5.4-1: *Reifefunktionen*

nach Saul	$R = \Sigma(T_i + 10) \cdot \Delta t_i$	in h · °C
	mit Δt_i Zeitintervall in h T_i mittlere Betontemperatur in °C im Zeitintervall Δt_i	
nach de Vree	$cal\ R = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i$	in h · °C
	mit Δt_i Zeitintervall in h Δr_i gewichtete Reife innerhalb des Zeitintervalls Δt_i	
	$r_i = \frac{10}{\ln C} \cdot [C^{(0{,}1\,T_i - 1{,}245)} - C^{-2{,}245}]$	in °C
	mit T_i mittlere Betontemperatur in °C im Zeitintervall Δt_i	
	C Wichtungsfaktor für die Zementart	
	Gehalt an Portland-zementklinker in M.-%	C-Wert
	>65 50–64 35–49 20–34	1,3 1,4 1,5 1,6

Aktivierungsenergie des Zements erfasst werden und führen zu einer „gewichteten Reife", z. B. RILEM TC 119-TCE (s. Abschnitt IV.2) [Bun1, Hin1].

Die Methode nach de Vree [Vre1] wählt ebenfalls einen Ansatz zur Ermittlung einer gewichteten Reife, der vor allem bei höheren Temperaturen (zum Beispiel Wärmebehandlung) besser der tatsächlichen Festigkeitsentwicklung entspricht (Tafel II.5.4-1)

als der Ansatz von Saul. Der ähnlich der Arrhenius-Gleichung aufgebaute Ansatz berücksichtigt den Einfluss des Zements und der Temperatur [Bun1]. Der Wichtungsfaktor für die Zementart *(C-Wert)* hängt von der Zementzusammensetzung ab und kann für baupraktische Berechnungen hinreichend genau in Abhängigkeit vom Klinkergehalt abgeschätzt werden (Tafel II.5.4-1).

Um aus der Reife die Druckfestigkeit ableiten zu können, muss für jede Betonzusammensetzung eine Kalibrierkurve auf der Basis eines bekannten Zeit-Temperatur-Druckfestigkeitsverlaufs aufgestellt werden [Bun1].

Die Anwendung des C-Wert-Verfahrens ist von Vorteil für die zerstörungsfreie, kontinuerliche Ermittlung der Druckfestigkeit von jungem Beton, z. B. für die Festlegung der Reife für das Vorspannen, Ausschalen oder Anheben von Betonfertigteilen und für die Festlegung der Mindestnachbehandlungsdauer (s. auch [Lan1, Vre1]).

Anstelle des Reifegrads wird auch der Begriff *des wirksamen Betonalters* benutzt. Das aus dem Temperatur-Zeit-Verlauf errechnete wirksame Betonalter entspricht dem wahren Betonalter, wenn der Beton ständig bei einer Normtemperaturlagerung von 20 °C erhärtet ist. Mit diesem wirksamen Alter kann die bis zu diesem Zeitpunkt erreichte Betonfestigkeit abgeschätzt werden, wenn der Festigkeitsverlauf für die Normtemperatur bekannt ist.

Bild II.5.4-1 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf des relativen wirksamen Alters nach Eurocode 2. Die einfache Näherung nach Saul stimmt im Temperaturbereich $5\,°C < T < 25\,°C$ gut mit diesem Verlauf überein, für $T > 25\,°C$ wird jedoch die beschleunigende Wirkung erhöhter Temperaturen unterschätzt. Für Temperaturen kleiner als 5 °C wird nach Saul die verlangsamende Wirkung niedriger Temperaturen überschätzt [Hil1].

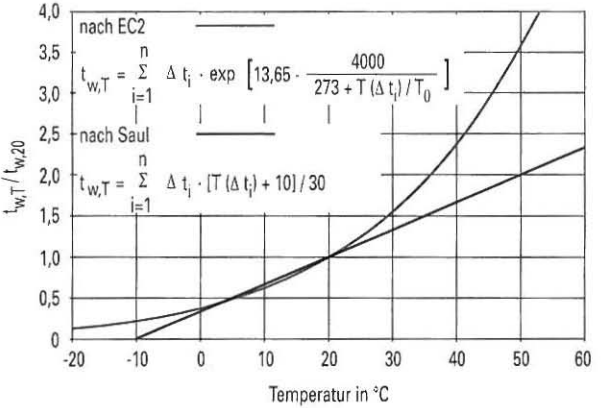


Bild II.5.4-1: Relatives wirksames Alter (T_i stellt die Temperatur im Zeitintervall Δt_i dar)

5.4.2 Nacherhärtung

Die 28-Tage-Druckfestigkeit ist unter anderem als Vergleichsbasis festgelegt worden, weil zementgebundene Mörtel und Betone im Alter von 28 Tagen bereits einen hohen Hydratationsgrad aufweisen und weil der Prüftag auf den gleichen Wochentag fällt wie der Herstelltag. Auch nach dem 28. Tag besitzt der Beton noch ein Erhärtungspotential, wodurch er immer fester wird, sofern er nicht vollständig austrocknet. Das Maß dieser *Nacherhärtung* ist je nach Zement, Betonzusammensetzung und weiteren Einflussgrößen recht unterschiedlich. Bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit ist mit einer umso größeren Nacherhärtung zu rechnen, je langsamer der Zement erhärtet, je höher der

Wasserzementwert und die Lagerungsfeuchte sind und je niedriger die Lagerungstemperatur ist [Bon2]. Die Nacherhärtung von Betonen aus sehr schnell erhärtenden Zementen ist klein und übersteigt nach etwa 180 Tagen in der Regel 10% nicht, zumal bei diesen Zementen zum Erreichen einer sehr hohen Frühfestigkeit häufig auch niedrige Wasserzementwerte gewählt werden. Demgegenüber weisen Betone aus langsam erhärtenden Zementen beträchtliche Nacherhärtungen auf, die in einzelnen Fällen nach 180 Tagen 50% erreichen oder überschreiten können. Übereinstimmend ergeben Untersuchungen über drei und fünf Jahrzehnte, dass sich die Festigkeit – bezogen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit bei Normlagerung – in der Praxis größenordnungsmäßig annähernd verdoppelt und in besonderen Fällen (grob aufgemahlene Zemente und hohe Wasserzementwerte) nahezu verfünffacht hat [Wal3].

Im Allgemeinen ist jedoch die Nacherhärtung über Jahrzehnte baupraktisch von geringerer Bedeutung. Dagegen kann die Festigkeitsentwicklung bis zu einem Alter von drei oder sechs Monaten, in besonderen Fällen sogar einem Jahr, bedeutsam sein, wenn das Bauwerk erst nach diesem Zeitraum entsprechend belastet wird und die Temperaturerhöhung im Bauteil äußerst klein gehalten werden soll oder wenn besondere Betrachtungen für die Bauwerksicherheit maßgebend sind.

Durch die Wahl der Zementfestigkeitsklasse werden bei gleicher Betonzusammensetzung unterschiedliche Druckfestigkeiten des Betons in jungem Alter erreicht. Sofern die für eine weitere Hydratation erforderliche Feuchtigkeit ständig vorhanden ist, gleichen sich diese zementbedingten Unterschiede durch die unterschiedliche Nacherhärtung zunehmend aus, sodass bereits in einem Alter von 180 Tagen Betone gleicher Zusammensetzung – unabhängig vom Zement – vergleichbare Druckfestigkeiten aufweisen [Dah1].

5.5 Erforderliche Erhärtungszeiten (Ausschalfristen)

Ein Betonbauteil darf erst ausgeschalt bzw. entformt werden, wenn der Beton ausreichend erhärtet ist, um die Beanspruchungen während des Bauzustands mit ausreichender Sicherheit ohne Schädigung aufzunehmen. So ist beispielsweise für die *Gefrierbeständigkeit* eine Frühfestigkeit von etwa 5 bis 10 N/mm² notwendig. Schadfreies Stapeln und Transportieren von Betonwaren setzt eine hinreichende Kantenfestigkeit voraus, die im Allgemeinen bei einer Druckfestigkeit von wenigstens 20 N/mm² gegeben ist. Demgegenüber erfordert das Vorspannen oder das Befahren einer Straße i. d. R. eine Druckfestigkeit von mehr als 30 oder 40 N/mm².

Im Einzelfall können Erhärtungsprüfungen zum Beispiel durch Ermittlung des *Reifegrads* unter den vorgegebenen Bedingungen notwendig sein (s. Abschnitt II.5.4.1). Durch eine an den Bautakt und die Jahreszeit angepasste Wahl der Zusammensetzung können die Anforderungen an die *Festigkeitsentwicklung* erfüllt werden. Dies stellt eine Optimierungsaufgabe dar, wenn die gewünschte Festigkeitsentwicklung wegen der Wärmefreisetzung nach oben begrenzt werden muss, zum Beispiel zur Verminderung von Zwangspannungen (s. Abschnitt II.6.4) [Gru4, Thi3, Hin1, Hin2].

Die erforderliche Nachbehandlungsdauer wurde allgemein durch einen Mindesthydratationsgrad definiert, den ein Beton während der Nachbehandlung erreichen muss. Sie kann nach Tafel II.9.6-1 in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons abgeschätzt werden. Art und Festigkeit des Zements sind dabei nur noch indirekt ein Kriterium für den Nachbehandlungsbedarf (s. Abschnitt II.9.6).

6 Formänderung von Beton

6.1 Verformungsursachen

Belastungen oder lastfreie Einwirkungen, wie z. B. Temperatur- und Feuchteänderungen, rufen im Frisch- und Festbeton *Formänderungen* hervor. Die auf die Anfangslänge bezogenen Formänderungen werden *Dehnungen* ε genannt. Infolge einer äußeren Belastung wird oft eine Verlängerung als *Dehnung* und eine Verkürzung als *Stauchung* bezeichnet.

Formänderungen des Frisch- bzw. des Festbetons müssen in Entwurf, Berechnung und Konstruktion und entsprechend auch bei der Betonzusammensetzung und Nachbehandlung berücksichtigt werden. Einen Überblick über die unterschiedlichen Formänderungen von Beton gibt **Tafel II.6.1-1**.

Die Formänderungen von Beton und damit auch die zugehörigen Kennwerte sind in der Regel temperaturabhängig. Die in diesem Abschnitt angeführten Zahlenwerte gelten für den normalen Temperaturbereich.

6.2 Formänderungen bei äußerer Lasteinwirkung

6.2.1 Last-Verformungsverhalten

Unter äußerer Last weist Beton Formänderungen auf, die nach Entlastung, bedingt durch innere zwischenmolekulare Kräfte, nicht sofort und nicht vollständig reversibel (umkehrbar) sind, d. h. neben elastischen treten auch viskoselastische oder plasti-

Tafel II.6.1-1: Formänderungen von Beton

Verformungen				
lastabhängig			lastunabhängig	
kurzzeitig[1)]	langzeitig		Wärmedehnungen	Feuchtedehnungen (Schwinden, Quellen)
elastisch	verzögert elastisch	verzögert plastisch		
	Kriechen			
$\varepsilon_{el} = \sigma_{verh} / E_{cm}$	$\varepsilon_k = \varphi(t, t_0) \cdot \varepsilon_{el,o}$		$\varepsilon_T = \alpha_{th} \cdot \Delta T$	$\varepsilon_{hygrisch}$
umkehrbar	umkehrbar	nicht umkehrbar	umkehrbar	teilweise umkehrbar bei Feuchtigkeitsänderung
wenig temperaturabhängig	temperaturabhängig			

[1)] Neben elastischen Verformungen treten auch geringfügige bleibende Verformungen auf

sche Anteile auf. Beton wird daher als viskoselastischer Stoff betrachtet.

Die gesamte Formänderung von Beton unter äußerer Belastung kann in kurzzeitige, d.h. zeitunabhängige (sofort eintretende) und langzeitige, d.h. zeitabhängige (verzögert eintretende) Anteile aufgeteilt werden (s. Tafel II.6.1-1). Sie werden als *elastisch* ε_{el} bezeichnet, wenn sie reversibel sind, und meist als *plastisch* bezeichnet, wenn sie irreversibel (nicht umkehrbar) sind. Auch bei kurzzeitiger Belastung verhält sich Beton nur näherungsweise elastisch. Bei Entlastung nach kurzzeitiger Spannungseinwirkung sind bleibende Dehnungen vorhanden, die umso größer sind, je näher die erreichte Spannung an der Bruchspannung lag. Die Summe aus verzögert elastischer ε_v und verzögert plastischer ε_f Formänderung wird als *Kriechen* ε_k bezeichnet. Das last- und zeitabhängige Verformungsverhalten

ist in **Bild II.6.2-1(a)** dargestellt. Die unter einer bestimmten „Belastungsgeschichte" aufgetretenen Dehnungen können auch in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt werden (s. **Bild II.6.2-1(b)**).

6.2.2 Verformungen bei Kurzzeitbelastung

Die *Spannungsdehnungslinie* (σ-ε-Linie) von Beton hat unter kurzzeitiger einachsiger Druckbeanspruchung einen charakteristischen Verlauf (s. Bild II.6.2-1(b)). Sie ist von Anfang an leicht gekrümmt und folgt somit im aufsteigenden Ast nur näherungsweise dem Hooke'schen Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad [Gl.II.6.2\text{-}1]$$

wobei E für den *Elastizitätsmodul* steht. Unter den im Gebrauchszustand auftretenden Kurzzeitbelastungen können die Verformungen ausreichend genau als linear von der Belastung abhängig betrachtet werden.

Die Krümmung der σ-ε-Linie geht im Wesentlichen auf *Mikrorisse* im Zementstein und in der Verbundzone Zuschlag-Matrix zurück (s. Abschnitt II.3), die durch die Belastung bzw. durch Schwinden und Temperatureinflüsse verursacht werden (s. **Bild II.6.2-2**). Bei Laststeigerung bis zu rd. 40% der Bruchspannung entwickeln sich Mikrorisse in kleiner Zahl, die an Inhomogenitäten der Matrix beginnen. Bis hier erstreckt sich der Bereich der Gebrauchsbeanspruchung. Darüber hinaus vermehren sich Risse lastabhängig in den Kontaktzonen zwischen Matrix und Zuschlag und die Verformungen nehmen stärker zu. Ungefähr mit dem Ende des stabilen (lastabhängigen) Risswachstums bei rd. $0{,}7 \cdot f_c$ bis $0{,}9 \cdot f_c$ wird die *Dauerstandfestigkeit* erreicht. Weitere Laststeigerungen mit instabilem Risswachstum führen in begrenzter Zeit zum Bruch. Die Druckbruchdehnung von Beton beträgt rd. $\varepsilon_{cu} = -2$ bis $-2{,}5$ mm/m.

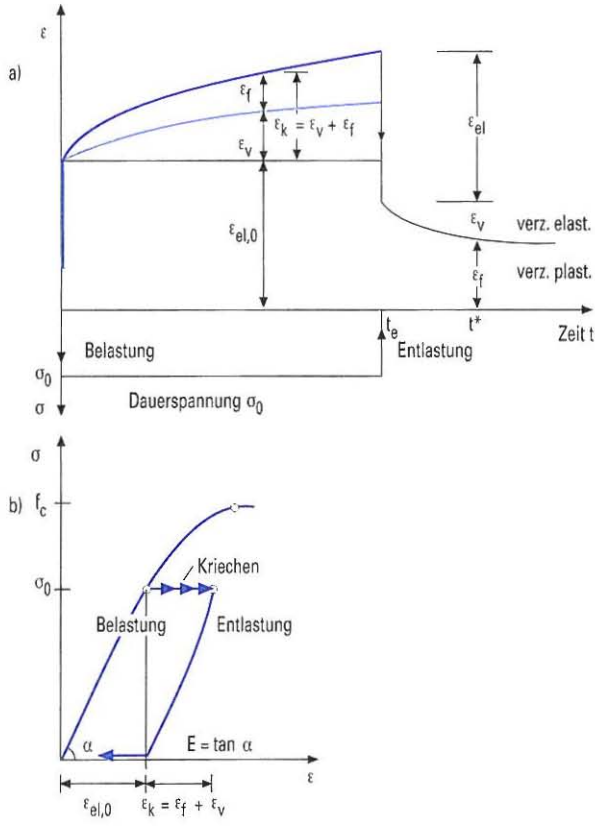


Bild II.6.2-1: Verformungsverhalten von Beton bei äußerer Belastung (schematisch)

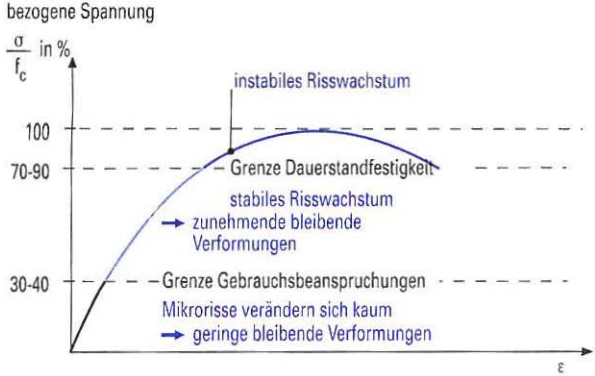


Bild II.6.2-2: Gefügeveränderungen unter Druckbeanspruchung

Unter Zugbeanspruchung wird eine weitgehend lineare Dehnungszunahme von ca. 70 bis 80% der Zugfestigkeit beobachtet. Die Zugfestigkeit kann sehr stark durch Eigen- und Gefügespannungen, z. B. infolge Austrocknens, vermindert werden. Sie entwickelt sich zeitlich nicht proportional zur Druckfestigkeit (s. Abschnitt II.3), sondern schneller. Die Zugbruchdehnung von Beton beträgt rd. 0,1 bis 0,15 mm/m.

Quer zu den Dehnungen ε_l in Beanspruchungsrichtung (Linie a in **Bild II.6.2-3**) treten Dehnungen ε_q auf (Linie b in Bild II.6.2-3), die über die *Querdehnungszahl* μ zu ε_l proportional sind:

$$\varepsilon_q = -\mu \cdot \varepsilon_l \qquad \text{[Gl.II.6.2-2]}$$

Die Querdehnungszahl hängt von der Betonzusammensetzung, vom Alter und Feuchtigkeitszustand sowie von der Prüfspannung ab. Im elastischen Bereich liegt μ zwischen 0,15 und 0,25,

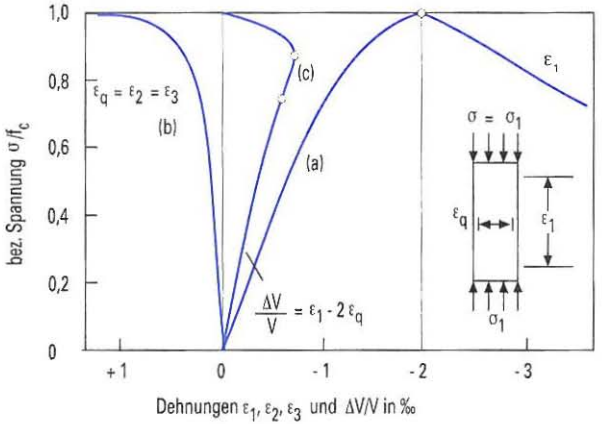


Bild II.6.2-3: Längs-, Quer- und Volumendehnung von Beton bei einachsigem Druck und konstanter Verformungsgeschwindigkeit

steigt bei Druckspannungen oberhalb von etwa 40% der Druckfestigkeit deutlich an und erreicht bei Spannungen knapp unterhalb der Bruchspannung Werte um $\mu = 0{,}5$. Die Volumenänderung $\Delta V/V$ des Betonkörpers (Linie c in Bild II.6.2-3) stellt ein Maß für die Verdichtung oder Auflockerung des Gefüges dar. Bei rd. 90% der Bruchspannung findet infolge der rasch wachsenden *Querdehnung* ein Übergang von der Volumenverminderung zu einer Volumenvergrößerung statt. Unter diesem Lastniveau ist wegen der zunehmenden Gefügeauflockerung die Dauerstandfestigkeit bereits überschritten.

Der Einfluss der Querdehnung ist bei der Bemessung von Bauteilen meist vernachlässigbar ($\mu = 0$); soll die Querdehnung z. B.

bei Flächentragwerken berücksichtigt werden, darf einheitlich nach E DIN 1045-1 mit $\mu = 0{,}2$ gerechnet werden.

Für die Berechnung der Verformungen im *Gebrauchszustand* von Betonbauteilen wird elastisches Verhalten angenommen, das über den E-Modul berücksichtigt wird. Der *E-Modul* wird entweder durch die Neigung der σ-ε-Linie im Ursprung beschrieben oder durch die Neigung der Sekante zwischen Beanspruchungen von ca. 0 N/mm² und etwa 1/3 der Festigkeit (s. DIN 1048-5 und Bild II.6.2-1 (b)). Näherungsweise entspricht der Ursprungsmodul auch dem Zugelastizitätsmodul.

Der E-Modul von Normalbeton nimmt mit der Festigkeit der Matrix, mit abnehmendem Matrixvolumen und mit dem Elastizitätsmodul des Zuschlags zu. Der E-Modul von Beton kann aus den E-Moduln und den Volumenanteilen des Zuschlags und der Matrix anhand von Modellen abgeschätzt werden [Man4]. Der E-Modul von Normalbeton liegt mit 20 000 bis 40 000 N/mm² im Alter von 28 d zwischen dem E-Modul der Matrix (5000 bis 20 000 N/mm²) und dem E-Modul des Zuschlags (20 000 bis 100 000 N/mm²) (Abschnitt II.3.3, Tafel II.3.3-1).

Für Normalbeton kann der E-Modul mit ausreichender Genauigkeit in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit rechnerisch ermittelt werden (E_{cm} nach **Tafel II.6.2-1** gemäß E DIN 1045-1). Für Leichtbeton mit E-Moduln des Zuschlags zwischen 3000 und 20 000 N/mm², die oft niedriger als der E-Modul der Matrix sind, muss der Einfluss der Rohdichte ρ auf den E-Modul zusätzlich rechnerisch berücksichtigt werden (s. Tafel II.6.2-1). Erhebliche Abweichungen von diesen Rechenwerten sind möglich.

Für übliche Betonbauwerke kann das elastische Verformungsverhalten ausreichend genau mit den E-Moduln in Tafel II.6.2-1 abgeschätzt werden. Bei Bauwerken, deren Gebrauchs- und

Tafel II.6.2-1: *Festigkeitsklassen* und *E-Moduln* von Normalbeton und Leichtbeton

Normalbeton			Leichtbeton		
Festigkeits-klasse	f_{ck} N/mm²	E_{cm} kN/mm²	f_{ck} N/mm²	ρ kg/m³	E_{cm} kN/mm²
C12	12	25,8	12	1200	7,7
C16	16	27,4	16	1200	8,2
C20	20	28,8	20	1300	10,1
C25	25	30,5	25	1300	10,7
C30	30	31,9	30	1400	12,9
C35	35	33,3	35	1500	15,5
C40	40	34,5	40	1500	16,0
C45	45	35,7	45	1600	18,9
C50	50	36,8	50	1600	19,5
C55	55	37,8	55	1700	22,6
C60	60	38,8	60	1800	26,0
C70	70	40,6	Normalbeton: $E_{cm} = 9{,}5\,(f_{ck} + 8)^{1/3}$		
C80	80	42,3			
C90	90	43,8	Leichtbeton: $E_{lcm} = E_{cm} \cdot \eta_E$ mit $\eta_E = (\rho/2200)^2$		
C100	100	45,2			

Tragverhalten stark von ihrem Verformungsverhalten beeinflusst wird, wie z. B. Tragkonstruktionen mit großer Spannweite und/oder Vorspannung, muss sichergestellt werden, dass der E-Modul des eingebauten Betons den Annahmen bei der Trag-

werksplanung entspricht. In diesen Fällen ist besonders darauf zu achten, dass die Schnittstelle zwischen Rechenannahmen und Ausführung durch entsprechende qualitätssichernde Maßnahmen abgesichert wird.

Der mittels Resonanzfrequenz oder Ultraschall ermittelte *dynamische E-Modul* ist stets größer als der statisch ermittelte E-Modul. Das Verhältnis zwischen beiden Moduln ist jedoch keine konstante Größe. Daher kann die statische Prüfung des E-Moduls in der Regel nicht durch eine dynamische (zerstörungsfreie) Prüfung ersetzt werden.

6.2.3 Verformungen unter Dauerbeanspruchung

Unter Dauerlast besteht die gesamte Dehnung aus einem sofort eintretenden elastischen Teil ε_{el} und aus einem Teil, der im Laufe der Zeit zunimmt, der Kriechdehnung ε_k (s. Tafel II.6.1-1 und Bild II.6.2-1). Die Kriechvorgänge werden im Wesentlichen auf die Bewegung und Umlagerung von Wasser im Zementstein und auf damit verbundene Gleitvorgänge zurückgeführt.

Der Teil des Kriechens, der bei gleich bleibender Wassersättigung, d. h. im hygrischen Gleichgewicht auftritt, wird als Grundkriechen bezeichnet. Bei gleichzeitiger Austrocknung spricht man von Trocknungskriechen, das das 1,1- bis 1,7-fache des Grundkriechens erreichen kann.

Bis zu einer *Dauerspannung* σ_o von etwa 40% der Druckfestigkeit sind die Kriechverformungen proportional zur Spannung und damit zur elastischen Verformung infolge σ_o. Für höhere Dauerbelastungen muss gegebenenfalls die Nichtlinearität berücksichtigt werden, s. z. B. [She1] und CEB-FIB Model Code 1990 (s. Abschnitt IV.2.5). Die *Kriechzahl* $\varphi(t, t_o)$ gibt das Verhältnis von Kriechverformung im Zeitpunkt t für ein Belastungsalter t_o zur elastischen Verformung $\varepsilon_{el,0}$ wieder (Tafel II.6.1-1).

Die Größe der Kriechverformung hängt maßgeblich ab von der Belastungshöhe, von der Belastungsdauer, den Umweltbedingungen, der Betonzusammensetzung, vom Erhärtungszustand (Reifegrad) bei Belastungsbeginn sowie von den Bauteilabmessungen. Je feuchter die Umgebungsbedingungen, je niedriger der Wasserzementwert und das Zementleimvolumen und je höher der Reifegrad, desto geringer fällt bei sonst gleichen Verhältnissen das Kriechen aus. Der Einfluss der Zusammensetzung kann in der Praxis mit ausreichender Genauigkeit über die Konsistenz des Frischbetons, über die Betonfestigkeitsklasse und über die Erhärtungsgeschwindigkeit des Zements erfasst werden.

Das Kriechen strebt mit abnehmender Geschwindigkeit der *Endkriechdehnung* zu. Da im Allgemeinen die Auswirkungen des Kriechens nur für den Zeitpunkt $t = \infty$ zu berücksichtigen sind, kann vereinfacht mit φ_∞ gerechnet werden. E DIN 1045-1 enthält Angaben für die Bestimmung von φ_∞ für Normalbeton. Für hochfesten Beton und Leichtbeton müssen zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden. Weitere Angaben über das Betonkriechen können auch aus [Nev1, Baz1, Baz2] entnommen werden.

Ein Sonderfall des Kriechens unter veränderlicher Spannung stellt die *Relaxation* dar. Sie drückt den Spannungsabfall bei konstant gehaltener Dehnung aus. Analog zur Kriechzahl kann die Relaxation durch eine Relaxationszahl Ψ beschrieben werden (**Bild II.6.2-4**). Näherungsweise gilt folgender Zusammenhang zwischen Relaxations- und Kriechzahl:

$$\Psi(t, t_o) = \varphi(t, t_o) / [1 + \xi \cdot \varphi(t, t_o)] \qquad [Gl.II.6.2\text{-}3]$$

mit ξ (Relaxationsbeiwert), der nach [Tro1, Baz3] i.d.R. mit 1 angesetzt werden kann.

Umfassendere Angaben über die Relaxation können aus [She1, Tro1, Baz3, Ros3, Hin3] entnommen werden.

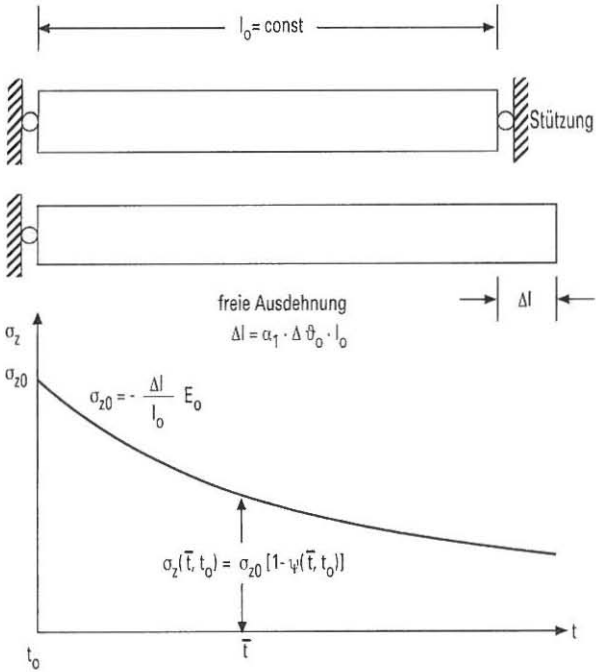


Bild II.6.2-4: Relaxation einer thermischen Zwangspannung von Beton, Beispiel [Ros2]

6.3 Lastunabhängige Verformungen

6.3.1 Ursachen

Formänderungen ohne äußere Lasteinwirkung werden durch Änderungen des Feuchtehaushalts im Beton (Schwinden und

Quellen) oder durch Temperaturänderungen hervorgerufen. Daneben können auch bei nicht sachgerechter Betonzusammensetzung volumenvergrößernde chemische Reaktionen (Treiben) auftreten (s. Abschnitte II.7.3.3 und II.7.6).

6.3.2 Hygrisch bedingte Verformungen

Zementgebundene Werkstoffe werden durch Veränderungen des Feuchtehaushalts in den Poren des Zementsteins verformt. Durch Austrocknung bedingte Volumenabnahmen werden als *Schwinden*, durch Feuchtezufuhr verursachte Volumenzunahmen als *Quellen* bezeichnet. Die Feuchtegehaltsänderung kann durch kapillaren Wassertransport oder durch Diffusion erfolgen. Diese Zusammenhänge sind u. a. in [Gru3] näher dargestellt. Schwind- und Quellmaße werden in der Regel als lineare (eindimensionale) Formänderungen angegeben. Beim Schwinden unterscheidet man vier Arten.

Das *Kapillarschwinden (Frühschwinden, plastisches Schwinden)* entsteht durch Kapillarkräfte beim Entzug des Wassers aus dem frischen noch verarbeitbaren Beton, z. B. durch wassersaugende Zuschläge oder durch Verdunstung an der Oberfläche. In Betonen kann das plastische Schwinden bei fehlender Nachbehandlung bis zu rd. 4 mm/m betragen. Wenn der „grüne" Beton nicht mehr plastisch verformbar ist, kommt das Kapillarschwinden zum Stillstand. Durch Kapillarschwinden können Risse senkrecht zur Oberfläche auftreten, die mehrere Zentimeter tief in den Beton hineinreichen.

Chemisches Schwinden entsteht durch die chemische Einbindung des Wassers in die Hydratphasen (Schrumpfen) und die damit gegebenenfalls verbundene „innere Austrocknung" während der Hydratation. Seine Größe hängt von der Betonzusammensetzung, insbesondere vom Wasserzementwert ab.

Messbare Schwindverformungen durch „innere Austrocknung" treten bei Betonen mit Wasserzementwerten < rd. 0,5 auf [Gru3]. Übliche Praxisbetone können Verformungen infolge chemischen Schwindens von bis zu rd. $\varepsilon_{cs} = -0{,}1$ mm/m, hochfeste Betone von rd. $\varepsilon_{cs} = -0{,}15$ bis $-0{,}25$ mm/m erreichen. Bei zwangbeanspruchten Bauteilen mit niedrigem w/z-Wert wird die frühe Rissbildung durch chemisches Schwinden gefördert, weil die Schwindverformung sich schon sehr früh auf den gesamten Querschnitt erstreckt. Langfristig ist das chemische Schwinden Teil des normalen Trocknungsschwindens.

Unter *Carbonatisierungsschwinden* versteht man ein irreversibles Schwinden, das durch die Reaktion des Kohlendioxids der Luft mit dem Calciumhydroxid im Zementstein entsteht. Es wird wie die Carbonatisierung durch niedrige Umgebungsfeuchten (50 bis 70% relative Feuchte) begünstigt. Durch Carbonatisierungsschwinden können Netzrisse entstehen, die den Korrosions- und Frostwiderstand des Betons im oberflächennahen Bereich beeinträchtigen können. Das Carbonatisierungsschwinden kann bis zu rd. 50% des Austrocknungsschwindens erreichen. Es ist jedoch bemessungstechnisch für Bauteile i. d. R. nicht relevant, weil es nur in der schmalen carbonatisierten Randzone auftritt.

Unter *Trocknungsschwinden* versteht man das Schwinden, das Festbeton während der Austrocknung durch Wasserverlust nach außen erleidet. Es wird durch Abgabe des chemisch nicht gebundenen Wassers aus den Kapillarporen hervorgerufen. Das Trocknungsschwinden hängt vor allem von der Umgebungsfeuchte, den Bauteilabmessungen und der Betonzusammensetzung ab.

Chemisches Schwinden und Trocknungsschwinden haben eine Volumenkontraktion in der Zementsteinmatrix zur Folge, die durch die nichtschwindenden Zuschläge behindert wird.

Bei gleichen Umweltbedingungen und Bauteilabmessungen hängt das Schwinden des Betons vom Zementsteinvolumen, vom E-Modul des Zuschlags und vom Verbund des Zuschlags zum Zementstein ab. Übliche Wasserzementwerte im Bereich von w/z = 0,4 bis 0,6 führen zum gleichen Schwindmaß, wenn die vorgenannten Einflussgrößen gleich sind [Gru3].

Art und Volumenanteil des Zuschlags beeinflussen die hygrischen Verformungen des Betons, da einerseits ein zunehmender Zuschlaggehalt zu einer Verringerung des Zementsteinvolumens führt und anderseits die Verformungen durch das Zuschlaggerüst behindert werden. Bei mindestens eintägiger Schalzeit und anschließender Austrocknung im Klima 20 °C/65 r.F. weist der Zementstein allein ein Schwindmaß von rd. $\varepsilon_{cs} = -3$ mm/m auf [Gru3]. Für praxisnahe Normalbetone mit nicht schwindenden quarzitischen Zuschlägen reduziert sich dieser Wert infolge des geringeren Zementsteinvolumens und der aussteifenden Wirkung des Zuschlagkorngerüsts auf rd. $\varepsilon_{cs\infty} = -0{,}6$ mm/m, d. h. rd. ein Fünftel. Die Behinderung durch das Zuschlaggerüst ist umso ausgeprägter, je größer der E-Modul des Zuschlags ist und je weniger der Zuschlag selbst schwindet. Ein Beton, der mit schwindfähigem Sandstein hergestellt wurde, wies dementsprechend mit $\varepsilon_{cs\infty} = -1{,}25$ mm/m ein wesentlich höheres Endschwindmaß auf als Beton mit dem steifen und nichtschwindenden Zuschlag Basalt, der nur $\varepsilon_{cs\infty} = -0{,}4$ mm/m erreichte. Weiterhin können poröse Zuschläge, z. B. einige Muschelkalksplitte oder rezyklierter Zuschlag, die hygrischen Verformungen der damit hergestellten Betone erheblich vergrößern, wenn sie selbst quellen oder schwinden.

Gegenüber trockenen Innenraumbedingungen verringern sich die Schwindmaße bei Außenbauteilen wegen der dort wesentlich höheren Umgebungsfeuchte und möglicher Wiederbefeuchtungszyklen erheblich. So reduziert sich für den vorgenannten

Tafel II.6.3-1: Endschwindmaß in mm/m für Normalbeton der Konsistenzklasse S2 oder S3 nach E DIN 1045-1 (für Bauteildicken zwischen 150 und 600 mm darf linear interpoliert werden)

Lage des Bauteils	relative Feuchte in %	wirksame Bauteildicke $2A_c/u$ in mm	
		≤150	600
innen	50	−0,60	−0,50
außen	80	−0,33	−0,28

Normalbeton das Schwinden unter trockenen Innenraumbedingungen von rd. $\varepsilon_{cs\infty} = -0{,}6$ mm/m auf etwa $\varepsilon_{cs\infty} \approx -0{,}3$ mm/m im Außenbereich, wie z. B. bei Betonfahrbahnen [Eic1].

Die beschriebenen Zusammenhänge machen deutlich, dass mögliche geringe Unterschiede im Schwindmaß verschiedener Zementsteine in der Regel keinen baupraktisch relevanten Einfluss auf das Schwindmaß von Beton haben.

Der Einfluss des Zementsteinvolumens wird in der Praxis durch die Konsistenz des Frischbetons erfasst, sodass die Rechenwerte für das Endschwindmaß in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, der Konsistenz und der mittleren Bauteildicke angegeben werden (s. **Tafel II.6.3-1**).

Das Schwinden bei wiederholtem Austrocknen nach Wiederbefeuchtung ist deutlich kleiner als bei erstmaligem Austrocknen, da nur ein Teil reversibel ist.

Als Restschwindmaß wird der Anteil des Schwindens bezeichnet, der nach einem bestimmten Zeitpunkt noch auftritt. Wie beim Kriechen strebt das Schwinden bei konstanten Lagerungsbedingungen einem Endwert zu, der im Wesentlichen von den

gleichen Parametern beeinflusst wird, die auch für das Kriechen maßgebend sind.

Als *Quellen* bezeichnet man die durch Wasserzufuhr verursachte Volumenzunahme. Das Quellen von Zementstein, der nach dem Ausschalen in Wasser gelagert wird, beträgt $\varepsilon_{s\infty} \approx 1$ mm/m. Das Quellen von Beton erreicht analog zum Schwinden etwa $^1/_5$ des Quellens von Zementstein [Gru3]. Entsprechend ist für dickere Bauteile ein Quellmaß von $\varepsilon_{s\infty} = -0{,}1$ mm/m nach DIN 1045 anzusetzen. Größer ist das Quellen nach einer ersten Austrocknung. Es beträgt etwa 40 bis 80% der durch die Austrocknung bedingten Schwindverformung.

6.3.3 Treiben

Treiberscheinungen gehen auf chemisch-mineralogische Reaktionen zurück, die im erhärteten Beton unter Volumenzunahme ablaufen. Ursache der Volumenzunahme ist in der Regel die Bildung großvolumiger Reaktionsprodukte, wie z. B. sekundäres Ettringit (Sulfattreiben) (s. Abschnitt I.5.8.2 und II.7.3.3) oder Alkalikieselsäuregel (Alkalireaktion) (s. Abschnitt II.7.6).

Da Zementstein aus normgerechtem Zement raumbeständig ist, kann er nur treiben, wenn Reaktionen zwischen Zementstein und Zuschlag, wie z. B. bei einer Alkalizuschlagsreaktion, auftreten oder wenn reaktionsfähige Stoffe von außen in den Beton eindringen, wie z. B. beim Sulfattreiben. Ein kontrolliertes Treiben durch Anwendung von *Quellzementen* [Rei1] kann in Sonderfällen gezielt genutzt werden, um z. B. das Schwinden zu kompensieren [Ram1]. Hierfür wird z. B. in den USA ein spezieller Zement (Typ K) produziert. In Deutschland dürfen solche Zemente nicht für Konstruktionsbauteile verwendet werden, weil das Treibmaß vom Feuchteangebot abhängt und dementsprechend für ein Bauteil nicht gezielt einstellbar ist. Außerdem

ist das Treiben während des normalen Hydratationsprozesses stets mit einer Auflockerung des Gefüges sowie mit einer Festigkeitsabnahme und Vergrößerung der Permeabilität verbunden. Möglichst großes Treiben ist z. B. bei der Herstellung von *„Expansionsmörteln"* erwünscht. Sie werden seit einigen Jahren alternativ zu Sprengstoffen als Hilfsmittel für den Abbruch von Bauwerken eingesetzt [Dub1].

6.3.4 Wärmedehnungsverhalten

Temperaturänderungen, die sowohl durch die bei der Hydratation des Zements freigesetzte Wärmeenergie (s. Abschnitt I.5) als auch durch Änderungen der Umgebungstemperatur im Tages- und Jahresverlauf verursacht werden können, bewirken mittlere Längenzu- bzw. -abnahmen der Bauteile (Tafel II.6.1-1).

Die Erwärmung durch Hydratation führt in der Regel außerdem zu einem Temperaturgefälle vom Kern zum Rand hin. Der Beton kann sich bei sehr dicken Bauteilen außen bereits wieder abkühlen und verkürzen, während er sich innen noch erwärmt und ausdehnt. Es können bei massiven Bauteilen Temperaturunterschiede zwischen Kern und Rändern von bis zu rd. 60 K auftreten, wenn keine Maßnahmen zur Verminderung der Temperaturgradiente getroffen werden. Außenbauteile sind zum Teil erheblichen Schwankungen der Umgebungstemperatur unterworfen. Die Temperaturunterschiede können zu größeren Dehnungsgradienten im Bauteil führen. Im Sommer z. B. kann sich im oberen Bereich einer Betonfahrbahndecke während eines Gewitterregens eine Temperaturdifferenz von bis zu 40 K einstellen.

Die *Wärmedehnzahl* von Beton α_{th} ist im Wesentlichen abhängig von der Wärmedehnzahl des Zuschlags α_{tg}, von der Wärmedehnzahl der Matrix α_{tz}, vom anteiligen Volumen des Zuschlags

V_g und der Matrix V_z sowie vom Feuchtigkeitsgehalt. Die Wärmedehnzahl des Betons kann wie folgt rechnerisch abgeschätzt werden:

$$\alpha_{tb} = \alpha_{tg} + (\alpha_{tz} - \alpha_{tg}) \cdot V_z^n \qquad \text{[Gl.II.6.3-1]}$$

mit $n \approx 1{,}5$

Die Wärmedehnzahl des Zuschlags liegt abhängig von der Gesteinsart zwischen 4 und $14 \cdot 10^{-6}$/K, die Wärmedehnzahl der Matrix liegt zwischen $10 \cdot 10^{-6}$/K und $23 \cdot 10^{-6}$/K. Für Beton liegt die Wärmedehnzahl somit zwischen 5 bis $14 \cdot 10^{-6}$/K, für Zementmörtel zwischen rd. 10 bis $20 \cdot 10^{-6}$/K. Für Normalbeton darf α_{tb} nach E DIN1045-1 mit $10 \cdot 10^{-6}$/K und für Leichtbeton mit $8 \cdot 10^{-6}$/K angenommen werden und entspricht damit in etwa der Wärmedehnzahl von Stahl. Wegen dieses günstigen Verhaltens ist im Stahlbeton nicht mit Temperaturzwang zwischen Bewehrung und Beton zu rechnen.

6.4 Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen im jungen Beton

Behinderte Verformungen aus Schwinden oder infolge abfließender Hydratationswärme können zu erheblichen Zugspannungen im Betonbauteil führen. Überschreiten die Zugspannungen die Zugfestigkeit, bzw. die behinderten Zugdehnungen die Zugbruchdehnung des Betons, so treten Risse auf. Wird die mittlere Formänderung von Bauteilen behindert, z. B. die Formänderung einer Wand auf bereits vorhandenem Fundament oder dicker Sohlplatte, so spricht man von *Zwang*. Dadurch ausgelöste Risse stellen sich in der Regel als durchgehende Trennrisse (Spaltrisse) dar. **Bild II.6.4-1** zeigt den möglichen Spannungsverlauf in einem solchen verformungsbehinderten Bauteil während der Erwärmung durch Hydratation. Während die Druckspannungen im Laufe der Erwärmung durch einen niedrigen E-Modul und die Relaxation des jungen Betons gering blei-

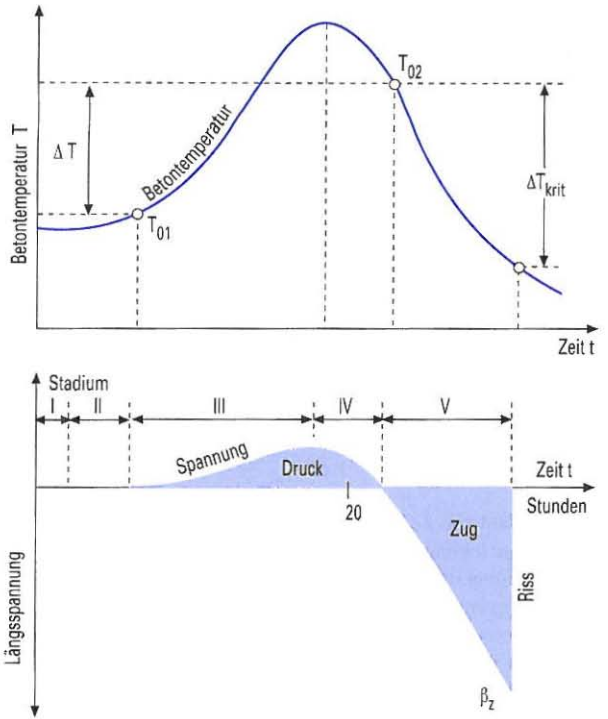


Bild II.6.4-1: Temperaturverlauf und Zwangspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch) [Spr6, Wei2]

ben, entstehen schon bald nach Überschreiten der Höchsttemperatur Zugspannungen, die gegebenenfalls zur Rissbildung führen.

Temperatur- oder Feuchtegradienten innerhalb eines Bauteils verursachen *Eigenspannungen.* Es handelt sich um einen Gleichgewichtszustand, der überwiegend (außen kalt/innen warm, außen trocken/innen feucht) durch Zugspannungen außen und Druckspannungen innen gekennzeichnet ist. Dadurch ausgelöste Risse im oberflächennahen Bereich werden als Schalenrisse bezeichnet. Im jungen Beton treten üblicherweise Eigen- und Zwangspannungen gleichzeitig auf. Anrisse in der äußeren Schale fördern die Einleitung von Trennrissen [Thi4]. Alle Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Rissen im jungen Beton (s. Abschnitt II.3) müssen demnach eine Verringerung der lastunabhängigen Verformungen oder der Verformungsbehinderung zum Ziel haben.

Um eine temporäre Temperaturerhöhung über die langfristige Lagerungstemperatur hinaus zu begrenzen, dienen folgende Maßnahmen:

Die Auswahl von Zementen mit langsamer und niedriger Wärmeentwicklung, die Begrenzung des Zementgehalts sowie die Wahl einer niedrigen Frischbetontemperatur. Werden gleichzeitig aus Gründen der Bauausführung (Ausschaltakt) Mindestanforderungen an die Festigkeitsentwicklung während der ersten Tage gestellt, ist die Betonzusammensetzung abhängig von der Frischbeton- und Umgebungstemperatur so zu wählen, dass einerseits eine ausreichende Frühfestigkeit erreicht wird und andererseits die damit verbundene Erwärmung auf das notwendige Maß begrenzt wird (s. Abschnitt II.5). Dabei ist darauf zu achten, dass die sonstigen Anforderungen, z. B. an Frostwiderstand, Verarbeitbarkeit, Undurchlässigkeit, erfüllt werden [Thi3, Hin3]. Eine weitere wirksame Maßnahme bei großen monolitischen Baukörpern besteht darin, die Hydratationswärme durch Kühlrohre abzuführen.

Tafel II.6.4-1: Anhaltswerte für die Abstände a von Bewegungsfugen in Betonbauteilen [Lam2]

Bauteil			Abstand a in m
unbewehrter Beton	allg. aufgehende Bauteile		bis 5 bis 10
Stahlbeton im Hochbau allg.			bis 30
Konstruktions-Leichtbeton allg.			8 bis 10
Brücken und Binder mit Rollenlagern			100 bis 200
Fundamentplatten	mit elastischer Oberkonstruktion mit steifer Oberkonstruktion		30 bis 40 15 bis 25
Skelettbauten	mit elastischer Unterkonstruktion mit steifer Unterkonstruktion lang gestreckte feingliedrige Teile		30 bis 40 15 bis 25 bis 10
Deckenplatten	Geschossdecken, Ortbeton Balkone, Brüstungen, Konsolen wärmegedämmte Dachdecken (Kaltdach) ungedämmte Dachdecken (Warmdach) ungedämmte Gefälle-Leichtbetone (Warmdach)		20 bis 30 15 bis 20 10 bis 15 5 bis 6 4 bis 6
Estriche	in Räumen im Freien		4 bis 6 2 bis 4
Stützwände	auf rolligen oder bindigen Böden	bewehrt unbewehrt	10 bis 15 bis 10
	auf Fels oder Beton	bewehrt unbewehrt	8 bis 10 bis 5
Widerlager und Flügelwände	bis 0,60 m Dicke 0,60 bis 1,00 m Dicke 1,00 bis 1,50 m Dicke 1,50 bis 2,00 m Dicke		8 bis 12 6 bis 10 5 bis 8 4 bis 6
Fahrbahnen	bewehrt unbewehrt		30 bis 50 5 bis 10
Schwimmbecken, Klärbecken			12 bis 15

Die Werte schwanken je nach Sonneneinstrahlung, Bewehrung oder Verankerung erheblich.

Tafel II.6.4-2: Richtwerte für den Fugenabstand in Wänden auf dickeren Fundamenten oder Sohlplatten nach [Gru1, Dah2]

Wanddicke in cm	Fugenabstand in m
30 bis 60	6 bis 4
60 bis 100	10 bis 6
100 bis 150	8 bis 5
150 bis 200	6 bis 4

Um die Verformungsbehinderung zu vermindern, hat sich im Tunnelbau eine Trennung zwischen der Ortbetoninnenschale und der Spritzbetonaußenschale durch Folien bewährt. Frühzeitige wasserrückhaltende oder wasserzuführende Nachbehandlung sind bewährte Maßnahmen, um Schwindverformungen im jungen Beton zu begrenzen. Durch eine gezielte leichte Wärmedämmung können auch die Temperaturgradienten und damit die Eigenspannungen infolge Hydratationswärme gering gehalten werden, ohne die mittlere Temperaturerhöhung im Bauteil zu steigern [Gru1].

Durch die Anordnung von *Fugen* werden die Zwangverformungen begrenzt. Der erforderliche Fugenabstand hängt insbesondere von den Bauteilabmessungen ab. Es gibt keine allgemein gültige Berechnungsmethode für den Fugenabstand und für die erforderliche Fugenbreite, allerdings liegen ausreichend begründete Erfahrungswerte vor, besonders für einzelne Bauteile, wie z. B. für Betonfahrbahnen und Brückenwiderlager (s. Abschnitt II.12). Für die Abstände von Bewegungsfugen in Bauteilen werden je nach Bauteilart und Dicke, Bewehrung, Konstruk-

tionssystem, Umwelteinflüssen und Verankerung unterschiedliche Werte empfohlen (s. **Tafel II.6.4-1**).

Unter Berücksichtigung des großen Einflusses der Schwindverformungen bei dünnen zwangbeanspruchten Wänden einerseits und des großen Einflusses der Temperaturerhöhung bei dicken zwangbeanspruchten Wänden andererseits werden Fugenabstände gemäß **Tafel II.6.4-2** zur Herstellung rissfreier Wände empfohlen.

Die Fugenbreite muss die Herstellbedingungen, die Fugenbewegung sowie die Abdichtungsart berücksichtigen, siehe hierzu DIN 18540, E DIN 1045-1 und E DIN 18197 sowie [Kla2].

7 Dauerhaftigkeit

7.1 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

7.1.1 Frost- und Frost-Tausalz-Angriff

Bauteile, die Witterungseinflüssen unmittelbar ausgesetzt sind, müssen einen ausreichenden Frost- und in einigen Fällen Frost-Tausalz-Widerstand während der gesamten Nutzungsdauer aufweisen. Die Beanspruchung reicht von geringem Frostangriff, z. B. bei Fassadenelementen, bis zu sehr starkem Frost-Tausalz-Angriff bei Betonfahrbahnen, Brückenkappen oder Räumerlaufbahnen von Kläranlagen. Zur Erzielung eines ausreichenden Widerstands legt E DIN 1045-2 Anforderungen u. a. an Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung fest. Die zz. angewandten Prüfverfahren erlauben es bisher nicht, den erforderlichen Widerstand für jeden Anwendungsfall ausreichend zuverlässig vorherzubestimmen.

7.1.2 Schädigungsvorgänge

Der Schädigung infolge eines Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriffs bei nicht ausreichendem Widerstand des Betons liegen komplexe mikroskopische und makroskopische Wechselwirkungen zugrunde, die im engen Zusammenhang mit dem Gefrierverhalten der *Porenflüssigkeit* stehen [Sta2]. Die Porenflüssigkeit von Beton enthält eine Vielzahl von dissoziierten Ionen, wodurch der Gefrierpunkt erniedrigt wird (s. Abschnitt I.4.2). Dieser Einfluss wird durch den Einsatz von Auftaumitteln und der dadurch bedingten Erhöhung der Ionenkonzentration in der Porenflüssigkeit wesentlich verstärkt.

Tafel II.7.1-1: Porengrößenverteilung nach [Set1]

Porenart	Porengröße	Porenfüllung	Gefrierpunkt
Grobporen	≥1 mm	leer	
Makroporen	<1 mm	saugend, sofort befüllbar	Wasser gefriert von 0 °C bis –20 °C
Mesokapillaren	<30 µm	saugend, in Minuten bis Wochen befüllbar	
Mikrokapillaren	<1 µm	durch kapillares Saugen nicht vollständig befüllbar	
Mesogelporen	<30 nm	durch Kondensation bei rel. F. 50% bis 98% befüllbar	Wasser gefriert von –20 °C bis –39 °C
Mikrogelporen	<1 nm	durch Sorption bei rel. F. <50% befüllbar	Wasser gefriert bei ca. –90 °C

Weiterhin erniedrigt sich der Gefrierpunkt des Porenwassers umso mehr, je kleiner die Poren sind (**Tafel II.7.1-1**). Das Porenvolumen sowie die Porengrößenverteilung und damit der Wasserzementwert sind deshalb wichtige Einflussgrößen für den *Frost-* und *Frost-Tausalz-Widerstand.* Die Porengrößenverteilung ändert sich während der Nutzungsdauer durch fortschreitende Hydratation und zusätzlich im oberflächennahen Bereich durch Carbonatisierung (s. Abschnitt II.7.2.2). Bis –20 °C gefriert maximal 30% des in den Kapillarporen vorkommenden Wassers [Sie2].

Der Phasenübergang von Wasser zu Eis ist mit einer 9%-igen Volumenzunahme verbunden, die zu einem hydraulischen Druck im Betongefüge führt. Stehen nicht genügend Ausweichräume (wasserfreie Poren) zur Verfügung oder sind diese Poren zu weit

voneinander entfernt, bauen sich Zugspannungen im Zementsteingefüge auf. Entscheidend für die Schädigungsintensität ist der Feuchtegehalt des Porensystems, der in thermodynamischer Wechselwirkung mit dem Zementstein bzw. der Matrix steht [Set2]. Während eines Frost-Tauwechsels entstehen im Betongefüge Druckunterschiede, wodurch bei einem ausreichenden äußeren Feuchteangebot weiteres Wasser in noch wasserfreie Poren des Betongefüges „gepumpt" wird. Durch wiederholte Frost-Tauwechsel kann sich die Sättigung zum Teil erheblich über das durch kapillares Saugen bei 20 °C erreichbare Maß erhöhen [Set3]. Fagerlund führte den Begriff der *„kritischen Sättigung"* ein [Fag1]. Sie wird vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung beeinflusst und ist erreicht, wenn der Feuchtegehalt so groß ist, dass der Beton durch einen oder wenige Frost-Tau-Wechsel stark geschädigt wird. Die Schädigungsphase unter Frostbeanspruchung tritt in der Praxis erst nach einer Einleitungsphase auf, nachdem der vorhandene Feuchtegehalt im Beton den kritischen Sättigungsgrad überschritten hat (s. in Analogie dazu Bild II.7.2-1).

Ungleiche Wärmedehnzahlen der einzelnen Betonkomponenten können ebenfalls einen Einfluss auf die Schädigung insbesondere in der Kontaktzone zu großen Zuschlägen haben. Mehr Bedeutung besitzt die bis zu 5-fach größere Temperaturdehnung des Eises gegenüber Zementstein. Bei anhaltender Abkühlung kontrahiert das Eis stärker als der umgebende Zementstein, wodurch Porenflüssigkeit in die so entstandenen Zwischenräume nachdiffundieren und gefrieren kann. Beim Erwärmen wird durch die größere Expansion des Eises ein verstärkter Druck aufgebaut, der zu Gefügeschädigungen führen kann [Grü1]. Der Einsatz von Auftaumitteln führt in den oberflächennahen Bereichen des Betons zu einer weiteren Verstärkung des Angriffs. Ursache dafür sind Spannungen, die u. a. durch den

plötzlichen Wärmeentzug beim Aufstreuen von Tausalzen (Temperaturschock), schichtenweises Gefrieren [Blü1] oder durch osmotische Drücke entstehen können. Außerdem steigt durch den Taumitteleinsatz bei zunehmendem Salzgehalt der Sättigungsgrad in den oberflächennahen Poren an.

Prinzipiell können zwei Schädigungsarten unterschieden werden – die Oberflächenabwitterung und eine innere Gefügeschädigung. Als Oberflächenabwitterung wird ein fortschreitender Verlust kleiner Partikel oder dünner Schichten des Betons durch Herauslösen oder Absprengen verstanden. Sie ist die am häufigsten beobachtete Schadensform des Frostangriffs. In Verbindung mit Auftausalzen kann sich die Abwitterung signifikant erhöhen, wobei bei einer Salzkonzentration von 3 bis 4% in der Lösung die größten Schäden zu beobachten sind [Püh1]. Des Weiteren zählen zur Oberflächenabwitterung auch die meist nur lokal anzutreffenden Abplatzungen (pop-outs). Sie treten häufig über oberflächennahen Zuschlägen auf. Ihren Ursprung haben sie entweder in einem nicht ausreichenden Verbund zwischen Matrix und Zuschlag oder in nicht frostbeständigen Zuschlagkörnern.

Als innere Gefügeschädigung wird eine fortschreitende Zerstörung des tieferliegenden Betongefüges verstanden. In Abhängigkeit vom Sättigungsgrad entstehen beim Gefrieren Spannungen, die zu ersten Mikrorissen führen. Im weiteren Verlauf kann die Schädigung durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel voranschreiten, da sich der Feuchtegehalt erhöht und somit die Spannungen beim Gefrieren weiter ansteigen. Der beginnende Frostschaden kann im Frühstadium optisch nicht erkannt werden. Er ist lediglich durch zerstörungsfreie Messungen, z. B. durch den Abfall des dynamischen E-Moduls des Betons erkennbar. Erst im fortgeschrittenen Schadensverlauf werden die Gefügeschädigungen durch Risse im Beton sichtbar.

7.1.3 Luftporenkennwerte

Künstlich eingeführte *Luftporen* dienen als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden hydraulischen Drucks. Sie können im Beton nur dann ausreichend wirksam werden, wenn sie in der gesamten Matrix fein verteilt sind, die Kapillarporen entsprechend häufig unterbrechen und nicht mit Porenflüssigkeit gefüllt sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich kleine Poren mit einem Durchmesser < 300 µm besonders günstig auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auswirken. Um diese kleinen Poren zu erzeugen, werden dem Beton, der einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen soll, Luftporenbildner zugegeben.

Wird Luftporenbeton sachgerecht hergestellt, kann der Gesamtluftporengehalt, der am Frischbeton nach DIN 1048-1 (zukünftig prEN 12350-7) bestimmt wird, als Kennwert für eine ausreichende Anzahl und Verteilung von Mikroporen angesehen werden. Zur Kennzeichnung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands ist jedoch eine genaue Bestimmung der Luftporengrößenverteilung aussagekräftiger. Neben dem Gesamtluftporengehalt gelten deshalb der Mikroluftporengehalt L_{300} (Gehalt an Poren < 300 µm) und der Abstandsfaktor AF als Nachweisgrößen. Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punkts im Zementstein von der nächsten künstlichen Luftpore.

Die Luftporenkennwerte werden im Allgemeinen am Festbeton durch Auszählen ermittelt. Mit einem neu entwickelten Gerät (Air Void Analyzer) [Sie3] können sie auch am Frischbeton bestimmt werden. Die am Frischbeton ermittelten Ergebnisse gelten bislang jedoch nur als orientierende Anhaltswerte.

7.1.4 Prüfverfahren

Die *Prüfung* des Frost- und des Frost-Tausalz-Widerstands besteht aus einer Zeitrafferprüfung, bei der die Prüfdauer durch Verstärkung des Angriffs, d. h. tiefere Temperaturen und höhere Abkühlgeschwindigkeiten, verkürzt wird. Die Ergebnisse sind nur bedingt auf die Praxis übertragbar. Sie können jedoch zur Überprüfung und Einordnung neuer Materialien und Betonrezepturen durch vergleichende Untersuchungen mit Materialien, die erfahrungsgemäß einen ausreichenden Widerstand aufweisen, herangezogen werden. Grenzwerte sind derzeit nicht in Normen festgeschrieben.

Im Teil 1 des europäischen Normenentwurfs prEN xxx für Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfungen werden dem Anwender drei Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenabwitterung zur Verfügung stehen. Als Referenzverfahren ist der schwedische Plattenversuch festgelegt worden. Weiterhin können als Alternativverfahren das Würfelverfahren und das CF-/CDF-Verfahren verwendet werden. Die Prüfkörper werden zyklischen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt, wobei als Prüfmedium demineralisiertes Wasser, 3%-ige NaCl-Lösung oder ggf. andere Taumittellösungen verwendet werden. Als Referenzverfahren zum Nachweis des Frost-Tausalz-Widerstands für Straßenbauerzeugnissen aus Beton wird in den europäischen Normen EN 13338, EN 13339 und EN 13340 das schwedische Plattenverfahren zukünftig enthalten sein.

Der Grad der Schädigung durch den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff wird bei diesen Prüfverfahren entweder durch den prozentualen Masseverlust des Probekörpers oder durch das abgewitterte Volumen, bezogen auf die zu prüfende Oberfläche, angegeben. Die Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse ist zurzeit noch nicht ausreichend [Sie4].

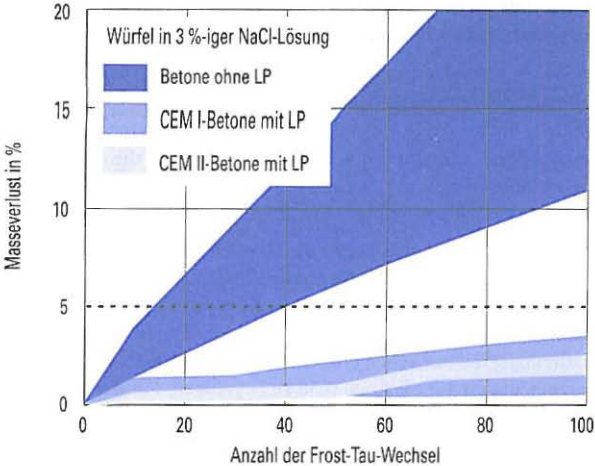


Bild II.7.1-1: Einfluss der künstlich eingeführten Luftporen auf die Abwitterung – Prüfung mit dem Würfelverfahren

Durch die Prüfverfahren bestätigt sich der positive Einfluss der Luftporenbildung auf den Frost-Tausalz-Widerstand sowohl bei Verwendung von Portland- als auch von Portlandkompositzementen (**Bild II.7.1-1**).

Auch für die Prüfung der inneren Gefügeschädigung gibt es inzwischen einige Verfahren. Im Allgemeinen wird der Abfall des dynamischen E-Moduls bei der Frostprüfung untersucht. Da der grundsätzliche Schadensablauf beim Frostangriff und die hierbei entstehende innere Gefügeschädigung nicht eindeutig geklärt sowie die Übertragbarkeit der bisher gewonnenen Laborergebnisse auf das Praxisverhalten nicht gegeben sind, können diese Verfahren zz. zur Überprüfung von Betonen noch nicht zuverlässig herangezogen werden.

7.1.5 Folgerungen für die Praxis zum Erreichen eines ausreichenden Frostwiderstands

In E DIN 1045-2 werden frostbeanspruchte Betone erstmalig in Abhängigkeit der Angriffsart und der Sättigung des Betongefüges in vier *Expositionsklassen* eingeteilt. Aufgrund von langjährigen baupraktischen Erfahrungen sind für die einzelnen Expositionsklassen Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung festgeschrieben worden (**Tafel II.7.1-2**).

Bei reinem Frostangriff gelten die Klassen XF1 für mäßige Wassersättigung und XF3 für starke Wassersättigung. Normale Außenbauteile wie Betonfassaden weisen im Allgemeinen eine mäßige Wassersättigung (XF1) auf. Bei ihnen wird der kritische Sättigungsgrad nur selten erreicht. Es reicht deshalb, den Wasserzementwert auf maximal 0,60 zu begrenzen. Für den hierfür zu verwendenden Zuschlag gelten die Regelanforderungen. Weitergehende Anforderungen gelten für Bauteile, die eine starke Wassersättigung (XF3) aufweisen, wie z. B. die Wasserwechselzonen von Schleusen. Erstmals sieht E DIN 1045-2 zwei Alternativen hierfür vor. Entweder ist ein dichter Zementstein mit einem Wasserzementwert $\leq 0{,}50$ herzustellen oder es sind bei einem höchstzulässigen Wasserzementwert von 0,55 künstliche Luftporen in den Beton einzuführen. Für Betone mit hohem Frostwiderstand können alle Zemente nach DIN 1164 eingesetzt werden. Eine Frostprüfung des Betons wird im Allgemeinen nicht für erforderlich gehalten. Nur im Wasserbau wird sie bei größeren Baumaßnahmen teilweise gefordert.

7.1.6 Folgerungen für die Praxis zum Erreichen eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands

Für einen Frost-Tausalz-Angriff sind ebenfalls zwei Klassen in E DIN 1045-2 vorgesehen, und zwar XF2 für mäßige Durchfeuchtung, z. B. für Bauteile im Sprühnebelbereich von Straßen,

Tafel II.7.1-2: Anforderungen an die Betonzusammensetzung nach E DIN 1045-2

höchstzulässiger w/z-Wert[1]		0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50
Mindestfestigkeitsklasse		C25/30	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37
Mindestzementgehalt ohne Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³		280	300	320	300	320	320
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³		270	keine Anrechnung erlaubt		270	270	keine Anrechnung erlaubt
Mindestluftgehalt in Abhängigkeit des Größtkorns der Zuschläge in V.-%	63 mm	–	3,5	–	3,5	–	3,5
	32 mm	–	4,0	–	4,0	–	4,0
	16 mm	–	4,5	–	4,5	–	4,5
	8 mm	–	5,5	–	5,5	–	5,5
verwendbare Zementarten[3]		alle Zemente nach DIN 1164 außer: CEM II-P CEM II/A-V CEM II/B-SV					CEM I CEM II-S CEM II-T CEM II/A-L CEM III/A[4] CEM III/B[5]
andere Anforderungen		Zuschlag mit Regelanforderungen Widerstand der Zuschläge gegen Frost bzw. Frost und Taumittel					

[1] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k · Zusatzstoff)-Wert) maßgebend.

[2] Erdfeuchter Beton (z. B. Pflastersteine) mit w/z < 0,40 darf ohne Luftporen hergestellt werden.

[3] Neben den genormten Zementen sind auch für den entsprechenden Anwendungsfall bauaufsichtlich zugelassene Zemente verwendbar.

[4] Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 R mit einem Hüttensandmassenanteil von ≤ 50 M.-%

[5] CEM III/B darf nur für die beiden folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:
a) Meerwasserbauteile: w/z ≤ 0,45; C35/45 und z ≥ 340 kg/m³
b) Räumerlaufbahnen: w/z ≤ 0,35; C40/50 und z ≥ 360 kg/m³ und Beachtung von DIN 19569
Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.

und XF4 für starke Durchfeuchtung, wie z. B. bei Brückenkappen, Betonfahrbahnen und Räumerlaufbahnen. Wie bei XF3 kann auch für die Expositionsklasse XF2 entweder ein Luftporenbeton mit einem Wasserzementwert $\leq 0{,}55$ oder ein etwas dichterer Beton ohne Luftporen mit einem Wasserzementwert $\leq 0{,}50$ hergestellt werden. Außer Trasszementen (CEM II-P), Flugaschezementen (CEM II/A-V) oder Portlandflugaschehüttenzementen (CEM II/B-SV) können alle Zemente der DIN 1164 verwendet werden. Als Betonzusatzstoff zugegebene Flugasche darf nicht auf den Wasserzementwert angerechnet werden. Auch darf der Mindestzementgehalt durch die Zugabe von Flugasche nicht verringert werden. Der Zuschlag muss, geprüft mit dem Magnesiumsulfat-Kristallisationsdruckversuch (s. Abschnitt II.2.5.6), höhere Anforderungen als bei einfachem Frostangriff erfüllen.

Noch höhere Anforderungen werden für die Expositionsklasse XF4 gestellt. Hier darf der Wasserzementwert 0,50 nicht überschreiten, und es sind künstlich eingeführte Luftporen erforderlich (Luftgehalt ≥ 4 Vol.-%). Über die Festlegungen für Zement bei der Klasse XF2 hinaus dürfen Hochofenzemente CEM III/A 32,5 sowie CEM III/A 32,5 R mit Hüttensandgehalten > 50% nicht verwendet werden. Für *Meerwasser*bauwerke und Räumerlaufbahnen in Kläranlagen können als Ausnahme Betone mit CEM III/B verwendet werden, wenn die Anforderungen nach Tafel II.7.1-2 eingehalten werden. Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden. Die Erfahrung zeigt, dass erdfeuchte Betone mit einem Wasserzementgehalt < 0,40, aus denen üblicherweise Straßenbauerzeugnisse, wie Betonpflastersteine, Gehwegplatten oder Bordsteine, hergestellt werden, ohne Zugabe von Luftporenbildnern einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen (s. Tafel II.7.1-2). Auch für den Zuschlag wird eine schärfere Anforderung an den Frost-Tausalz-Wider-

stand gestellt (s. Abschnitt II.2.5.6). Als Ursache für den geringeren Widerstand von Betonen mit hüttensandreichen Zementen (CEM III-Zemente) bei einem sehr starken Frost-Tausalz-Angriff der Expositionsklasse XF4 werden in [Lud3] Wechselwirkungen in der carbonatisierten Randschicht des Betons festgestellt. Neben der Umwandlung aluminathaltiger Hydratationsprodukte führen Umwandlungen metastabiler Carbonatmodifikationen *(Vaterit* und *Aragonit)* in der carbonatisierten Randschicht zu einer Vergröberung der Porenstruktur und damit zu einer deutlichen Erhöhung der Anfangsabwitterung. Mit steigendem Hüttensandgehalt der Zemente nimmt diese Anfangsabwitterung zu.

7.2 Bewehrungskorrosion

7.2.1 Alkalischer Korrosionsschutz

Grundsätzlich ist die Bewehrung in Stahlbetonbauteilen dauerhaft vor *Korrosion* geschützt. Dieser Schutz beruht auf der *Alkalität* der Porenlösung im Beton (pH-Werte $\geq 12{,}5$), bei der sich eine stabile *Passivschicht* aus Eisenoxiden auf der Stahloberfläche ausbildet. Die Eisenauflösung wird dadurch praktisch vollständig verhindert. Die *Passivität* der Stahloberfläche im Beton kann jedoch entweder über größere oder örtlich eng begrenzte Oberflächenbereiche verloren gehen. Hierfür kommen zwei Vorgänge in Frage:

1. Absinken des pH-Werts der Porenlösung durch Carbonatisierung des Betons auf Werte unter etwa 10 (s. Abschnitt II.7.2.2),
2. Überschreiten eines kritischen Grenzwerts für den Chloridgehalt an der Stahloberfläche durch eindringende Chloridionen (s. Abschnitt II.7.2.3).

Die Wirkungen der beiden Vorgänge werden unter dem Begriff der *Depassivierung* der Stahloberfläche zusammengefasst. Bei

ausreichendem Feuchtigkeits- und Sauerstoffangebot kann als Folge der Depassivierung Korrosion der Bewehrung auftreten, die Korrosionsschäden wie Risse oder schalenförmige Betonabplatzungen oder bei entsprechendem Stahlabtrag den Verlust der Tragfähigkeit zur Folge haben kann.

Die Einleitungsprozesse zur Korrosion (Carbonatisierung, Eindringen von Chloriden) und der Schädigungsprozess selbst (Korrosion der Bewehrung) werden von unterschiedlichen Parametern beeinflusst. Deshalb müssen Einleitungs- und Schädigungsphase getrennt voneinander betrachtet werden **(Bild II.7.2-1)**.

7.2.2 Carbonatisierung

Unter *Carbonatisierung* versteht man die chemische Reaktion von alkalischen Bestandteilen des Zements mit Kohlendioxid zu Carbonaten. Durch diese Reaktion ändern sich die Struktur und wesentliche Eigenschaften des Betons [Kro1].

Der Carbonatisierungsvorgang läuft in drei Stufen ab. Zunächst diffundiert das unter natürlichen Verhältnissen mit einem Anteil von ca. 0,03 Vol.-% in der Luft enthaltene Kohlendioxid (CO_2) von der Betonoberfläche in das Porensystem des Betons (Konzentrationsausgleich). Dabei reagiert es zum Teil mit der Porenlösung zu Kohlensäure. Diese wiederum reagiert mit den carbonatisierungsfähigen Bestandteilen des Zementsteins, die im Porenwasser gelöst sind. Vom Gesamtangebot des bei der Hydratation der Calciumsilikate durch Hydrolyse abgespaltenen Calciumhydroxids ($Ca(OH)_2$) können nur sehr geringe Mengen im Porenwasser gelöst werden, der Rest liegt in kristalliner Form vor. Während der Umwandlung des gelösten $Ca(OH)_2$ in Calciumcarbonat ($CaCO_3$) gehen weitere Teile des kristallinen $Ca(OH)_2$ in Lösung, so dass die Calciumhydroxidlösung im Porensystem solange gesättigt bleibt, bis keine Teile des kristallinen $Ca(OH)_2$ mehr nachgelöst werden. Wenn das bei CO_2-Ein-

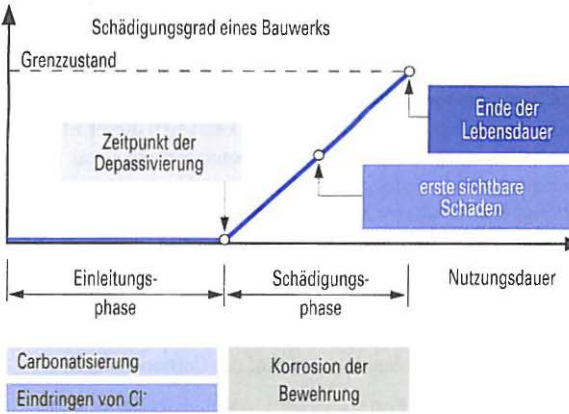


Bild II.7.2-1: Korrosion von Stahl in Beton – Einleitungs- und Schädigungsphase

wirkung reaktionsfähige $Ca(OH)_2$ verbraucht ist, werden auch die leichtlöslichen Natrium- und Kaliumhydroxide in Carbonate umgewandelt [Sch10]. Erst wenn alle gelösten Hydroxide umgewandelt sind, sinkt der pH-Wert des Betons und der alkalische Korrosionsschutz des Betonstahls kann verloren gehen.

Dieser als Carbonatisierung bezeichnete Vorgang ist im Wesentlichen von der Betonzusammensetzung, d. h. von den carbonatisierbaren Bestandteilen in Abhängigkeit von der Art des Zements und des Betonzusatzstoffs, von deren Anteil im Beton und von der Porosität (Wasserzementwert, Nachbehandlung des Betons) sowie weiterhin von den Lagerungsbedingungen während der Carbonatisierung (relative Luftfeuchte, Feuchtigkeitsgehalt des Betons, CO_2-Gehalt der Luft) und der Einwirkungsdauer abhängig.

Beton aus Portlandzement hat wegen des hohen Calciumhydroxidgehalts im Zementstein einen erhöhten Widerstand gegen Carbonatisierung. Die Porosität der Randzone wird durch die Carbonatisierung etwas verringert. Bei Beton aus Hochofenzement mit hohen Hüttensandgehalten kehrt sich dieser Effekt um, die Porosität nimmt nach der Carbonatisierung etwas zu. Da Beton aus Hochofenzement i. d. R. auch langsamer erhärtet, benötigt er eine längere Nachbehandlung, um einen ausreichenden Carbonatisierungswiderstand zu erreichen.

Durch unzureichende *Nachbehandlung* und frühzeitige Austrocknung des Betons wird die Hydratation verlangsamt bzw. unterbrochen. Das daraus resultierende größere Porenvolumen führt zu einem beschleunigten Ablauf der Carbonatisierung.

Maßgebend für den Fortschritt der Carbonatisierung sind die klimatischen Umgebungsbedingungen, insbesondere das Mikroklima im Bereich der Betonoberfläche. Relative Luftfeuchtigkeiten von 50 bis 70% begünstigen die Carbonatisierung, da einerseits für die CO_2-Reaktion Wasser vorhanden sein muß (trockener Zementstein unter etwa 30% relativer Luftfeuchte kann nicht carbonatisieren [Wie2]), andererseits aber das CO_2-Gas nur durch nicht wassergesättigte Poren diffundieren kann. Dadurch ist die Carbonatisierungstiefe in Innenräumen meist höher als im Freien [Sor1]. Mit zunehmender Feuchtigkeit nimmt die Eindringgeschwindigkeit der Carbonatisierungsfront ab. Außenbauteilbedingungen und insbesondere direkte Beregnung wirken sich deshalb hemmend auf die Carbonatisierung aus. Die Ursache für die langsamere Carbonatisierungsgeschwindigkeit bei wechselnder Umgebungsfeuchte liegt in erster Linie an der unterschiedlichen Geschwindigkeit des Wassertransports bei Austrocknung und kapillarer Wasseraufnahme. Wenn die Betonrandzone z. B. durch Schlagregenbeanspruchung wassergesättigt ist, kommt die Carbonatisierung praktisch zum

Stillstand, da das CO_2 nur über teilweise ausgetrockneten Beton eindringen kann. In wassergesättigtem Beton ist der Diffusionswiderstand gegenüber CO_2 etwa um vier bis fünf Größenordnungen größer als bei teilweise ausgetrocknetem Beton [Sch10]. Der Carbonatisierungsfortschritt bei wassergesättigtem Beton ist deshalb praktisch vernachlässigbar.

Für eine Reduzierung der Anfangscarbonatisierung ist es daher besonders wichtig, Beton so lange wie möglich vor dem Austrocknen zu schützen.

Tragwerkplaner und Benutzer interessiert die Zeit, in der die Carbonatisierungsfront bei gegebener Betondeckung die Bewehrung erreicht. Sie bestimmt die wartungsfreie Nutzungsdauer der Bauteile, wenn die Feuchtigkeit im carbonatisierten Bereich ausreicht, um Bewehrungskorrosion auszulösen.

Die Carbonatisierungstiefe d_c ist etwa linear von der Wurzel der Carbonatisierungsdauer t_c abhängig:

$$d_c = d_o + a\sqrt{t_c} \qquad \text{[Gl. II.7.2-1]}$$

Dabei ist d_0 ein Parameter, der von der Vorlagerung abhängt und mit späterem Carbonatisierungsbeginn t_0 kleiner wird. Der Faktor a beinhaltet die Parameter, die aus der Betonzusammensetzung und den Lagerungsbedingungen resultieren.

Bei wechselnder Durchfeuchtung verläuft die Carbonatisierung langsamer als dem $\sqrt{t_c}$-Gesetz entsprechend. Genauere Ansätze zur Beschreibung des Carbonatisierungsverhaltens sind in [Geh1] enthalten. Wenn zur Abschätzung der Eindringgeschwindigkeit der Carbonatisierung das $\sqrt{t_c}$-Gesetz herangezogen wird, liegt man jedoch auf der sicheren Seite.

7.2.3 Chlorideindringung

Chloride im Beton sind die Anionen entsprechender Salze, die im Porenwasser des Zementsteins in Lösung gehen. Diese können entweder durch die Ausgangsstoffe in den Beton eingetragen werden oder nachträglich in den Beton eindringen. Der Eintrag von Chloriden in den Beton ist eine wesentliche Ursache für die Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen. Dabei können Chloride zum einen das Gefüge des Zementsteins bei Frost-Tausalz-Angriff schädigen (s. Abschnitt II.7.1) und zum anderen zur Korrosion der Bewehrung führen.

Um die natürliche Chloridmenge, die über die Betonausgangsstoffe unvermeidbar bei der Herstellung in den Beton eingebracht werden, zu begrenzen, wurden korrosionsunbedenkliche Höchstwerte für den zulässigen *Gesamtchloridgehalt* im Beton festgelegt.

Unter entsprechenden Umweltbedingungen können zusätzlich zum vorhandenen natürlichen Chloridgehalt Chloride durch äußere Einwirkungen in den Beton eindringen. Dies kann Ursache für das Auslösen einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion oder eines Frost-Tausalz-Angriffs sein.

Von außen können Chloride z. B. bei planmäßiger Einwirkung (bei Meerwasserbauten), bei unplanmäßiger Einwirkung (bei Nutzungsänderung), bei Tausalzeinsatz (im Straßenwinterdienst) oder im Brandfall (bei PVC-Brand) in den Beton gelangen.

Baupraktisch von Bedeutung sind vor allem Natriumchlorid (NaCl), Calciumchlorid ($CaCl_2$) und Magnesiumchlorid ($MgCl_2$).

Die Chloridionen, die zunächst an der Betonoberfläche ihre höchste Konzentration haben, dringen durch Konvektion (zum Beispiel Wasserdruck, kapillarer Wassertransport) und/oder Diffusion infolge des Konzentrationsgefälles ins Betoninnere ein. In

der Praxis findet der Chloridtransport überwiegend durch Konvektion statt [Vol1]. Die Chloridionen werden sozusagen ‚huckepack' mit dem eindringenden Wasser in den Beton transportiert.

Ein trockener Beton kann durch die kapillare Saugwirkung relativ schnell größere Mengen chloridhaltigen Wassers aufnehmen. Im Falle der Austrocknung des Betons können die eingebrachten Chloridionen wieder in die Randzone zurück transportiert werden, d. h. Chloride konzentrieren sich in oberflächennahen Bereichen des Bauteils auf. Ebenso können bei dünnen, einseitig belüfteten Bauteilen große Chloridmengen von der beaufschlagten zur belüfteten Seite transportiert werden. Durch das Zurückbleiben der Chloride bei der Verdunstung kommt es zu einer Anreicherung auf der trockenen Seite. Bei Meerwasserbauwerken wurden daher die höchsten Chloridkonzentrationen über der Wasserwechselzone, bei Verkehrsbauwerken in Spritzwasserzonen ermittelt [Me11].

Gleichzeitig mit dem eigentlichen Eindringen von Chloridionen in Beton finden auch chemische und adsorptive Bindungsprozesse statt. Die chemische Bindung erfolgt hauptsächlich durch die Aluminate. In diesem Fall ist die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Zementsteins für eine Behinderung des Eindringens maßgebend. Weiterhin kann das Eindringen von Chloridionen durch sorptive Anlagerung in erster Linie an die Calciumsilicathydrat-Phasen behindert werden, wofür die vorhandene innere Oberfläche den entscheidenden Einflussparameter darstellt.

Die betontechnischen Parameter zur Beschreibung der *Chloridpenetration* in den Beton sind der *Chloriddiffusionswiderstand* und das *Chloridbindevermögen*. In der Regel werden zeit- und tiefenabhängige Gesamtchloridgehalte gemessen und als Chlo-

ridprofile angegeben. Dieses Verfahren orientiert sich an den Verhältnissen in der Baupraxis, da es sehr aufwendig ist, die freien und gebundenen Chloridgehalte getrennt voneinander zu ermitteln. Die ermittelten Chloridprofile lassen Rückschlüsse auf den Chlorideindringwiderstand des Betons zu. Dieser hängt im Wesentlichen von der Porenstruktur des Betons und damit von der Betonzusammensetzung, Verdichtung und Nachbehandlung sowie vom Chloridbindevermögen des Betons ab.

Der Wasserzementwert übt einen entscheidenden Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit von Chloridionen im Beton aus, da mit steigendem Wasserzementwert die Kapillarporosität des Betons zunimmt. Dadurch erhöhen sich sowohl die Eindringgeschwindigkeit als auch die maximale Eindringtiefe.

Beispielhaft zeigt **Bild II.7.2-2** typische Chloridprofile für verschiedene Wasserzementwerte nach Brodersen [Bro1]. In diesem Bild lassen sich drei Eigenschaften der *Chloriddiffusion* gut wieder erkennen:

- hyperbolische Konzentrationsverteilung ohne klar definierbare Begrenzung der Eindringtiefe,
- Einfluss der Zementart sowie
- Einfluss des Wasserzementwerts.

Die Zementart bzw. die stoffliche Zusammensetzung der Matrix üben einen nachweisbaren Einfluss auf den Diffusionswiderstand aus (z. B. [Bro1, Han2, Smo1]).

Betone aus hüttensandhaltigen Zementen besitzen einen im Vergleich zu Beton aus Portlandzement sonst gleicher Zusammensetzung höheren Chloriddiffusionswiderstand.

Im **Bild II.7.2-3** sind die in Versuchen ermittelten Diffusionskoeffizienten von Chlorid in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt dargestellt [Bro1]. Der Chloriddiffusionskoeffizient wird

mit zunehmendem Hüttensandgehalt im Hochofenzement bei gleichem Klinker deutlich vermindert. Ab Hüttensandgehalten größer als 50 M.-% ist kein signifikanter Einfluss auf den Diffusionskoeffizienten mehr zu erkennen. Es wurde nachgewiesen, dass der hohe Diffusionswiderstand von Hochofenzementen auf die höhere Dichtheit des Zementsteins und auf das adsorptive Chloridbindevermögen zurückgeführt werden kann [Bro1].

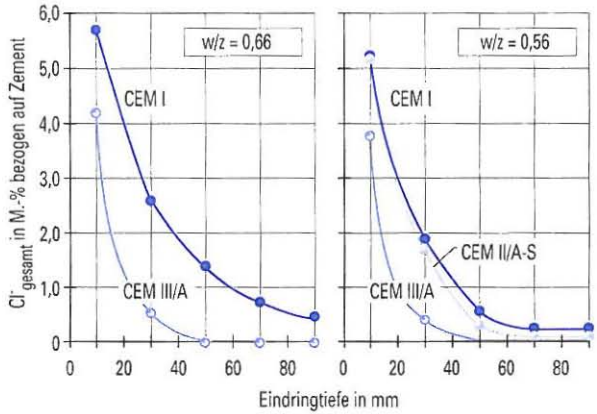
Der Einsatz von Flugasche führt unter sonst gleichen Bedingungen zu einer Verlangsamung der Chlorideindringung in den Zementstein. Als ursächlich dafür werden die Verdichtung der Porenstruktur durch den Einsatz von Flugasche, die Erhöhung der Verästelung (Tortuosität) des Porensystems sowie die hohe chemisorptive Bindekapazität von Flugasche im Zementstein angegeben [Li1].

Bei Einsatz von Silicastaub wurde festgestellt, dass sich trotz der Verringerung des pH-Werts der Porenlösung und der Verringerung der Chloridbindekapazität der Chloriddiffusionswiderstand erhöht hat. Durch Verringerung des äquivalenten Wasserzementwerts wird die Diffusionsgeschwindigkeit von Chlorid im Zementstein stark vermindert [Byf1].

Neben der Art des Zements, dem Wasserzementwert und dem Einsatz von Betonzusatzstoffen liegt im Hydratationsgrad des Zementsteins zum Zeitpunkt des ersten Chloridkontakts ein weiterer Einflussfaktor. Durch eine entsprechende Nachbehandlung wird insbesondere der Hydratationsgrad der Betonrandzone erheblich vergrößert und führt zu einem höheren Diffusionswiderstand.

7.2.4 Korrosionsprozess

Bild II.7.2-4 zeigt ein vereinfachtes Modell der *Korrosion* von Stahl in Beton. Die eigentliche Eisenauflösung findet an der



Lokalanode statt, die Sauerstoffreduktion zur Bildung von Hydroxidionen an der Lokalkathode. Anoden und Kathoden können je nach elektrolytischer Leitfähigkeit des Betons mehrere Dezimeter auseinander liegen, man spricht dann von *Makrokorrosion*selementbedingungen. Die anodische Eisenauflösung ist im Beton erst nach Depassivierung durch Carbonatisierung des Betons an der Stahloberfläche oder durch Überschreiten eines kritischen Chloridgehalts möglich.

Der kathodische Teilprozess, der mit keiner Materialschädigung verbunden ist, kann auch auf passiven Stahloberflächen ablaufen.

Die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons hängt von seinem Wassergehalt ab. Beton in trockenen Innenräumen ist nicht ausreichend feucht, um Korrosion von Stahl zu ermöglichen. Erst

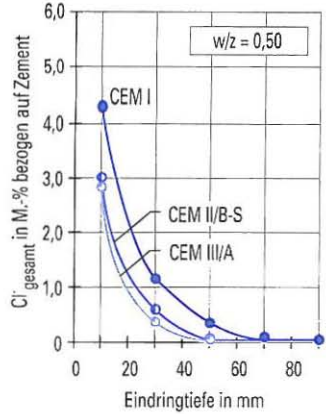


Bild II.7.2-2: Einfluss der Zementart und des Wasserzementwerts auf das Eindringen von Chlorid in Beton nach einjähriger Lagerung in 3molarer NaCl-Lösung [Bro1]

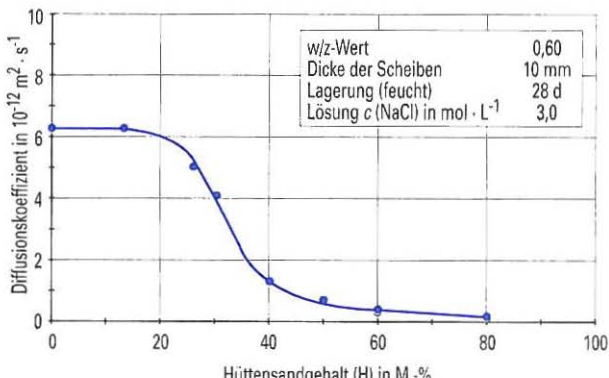


Bild II.7.2-3: Einfluss der Zementart auf den Diffusionskoeffizienten von Chlorid [Bro1]

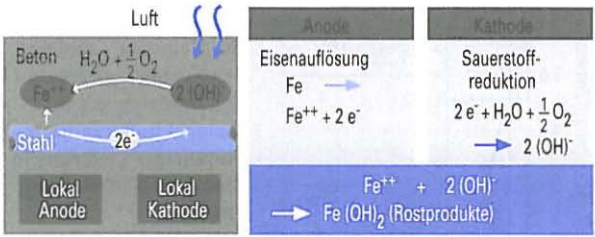


Bild II.7.2-4: Vereinfachtes Modell für die Korrosion von Stahl in Beton

wenn relative Luftfeuchtigkeiten von etwa 85 bis 90% überschritten werden, kann es zu Bewehrungskorrosion infolge Carbonatisierung kommen. Stahlbewehrungen korrodieren deshalb in trockenen Betonen auch dann nicht, wenn die Carbonatisierung die Bewehrung erreicht hat. Wegen der Hygroskopizität von Salzen muss bei chloridinduzierter Korrosion schon bei geringeren Umgebungsfeuchten mit Korrosion gerechnet werden.

Der zur Korrosion der Bewehrung erforderliche Sauerstoff kann mit Ausnahme eines vollständig wassergesättigten Betons praktisch immer in ausreichender Menge bis zur Stahloberfläche diffundieren [Grä2].

Um Makroelementkorrosion zu ermöglichen, müssen Potentialunterschiede auf der Stahloberfläche zwischen Anoden und Kathoden vorhanden sein, um den Ladungstransport zu ermöglichen. Solche Potentialdifferenzen sind zum Beispiel durch Belüftungsunterschiede (ungleichmäßige Betonqualität) in der Regel immer vorhanden oder sie stellen sich nach lokaler Depassivierung ein.

Die Tatsache, dass Korrosion an der Stahlbetonbewehrung erst nach Überschreiten einer kritischen Chloridgrenzkonzentration eintreten kann, hat zu dem Konzept des *‚kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts'* geführt, der als unterer Grenzwert den korrosionsbedenklichen Chloridgehalt im Beton angibt.

Umfangreiche Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt wurden von Breit [Bre1] durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt nicht durch einen konstanten Grenzwert definiert werden kann. Andererseits kann jedoch für die Startbedingungen der Lochfraßkorrosion, die mit dem unmittelbaren Überschreiten des korrosionsauslösenden Grenzwerts gleichzusetzen sind, ein fester Wertebereich der Chloridionenkonzentration angegeben werden, der sich unabhängig von betontechnischen Parametern ergibt. **Bild II.7.2-5** zeigt als relative Summenhäufigkeit (Klassenbreite 0,05 M.-%) die Korrosionswahrscheinlichkeit im ermittelten Wertebereich der Startbedingungen der Lochfraßkorrosion.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand stellt ein Gesamtchloridgehalt von etwa 0,2 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, die unterste Grenze des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts für Stahl in Beton dar. Mit Überschreiten dieser Grenze ist jedoch nicht zwingend die Initiierung der Lochfraßkorrosion verbunden. Die Wahrscheinlichkeit, dass bereits bei diesem Grenzwert die Startbedingungen für Korrosion vorliegen, ist vergleichsweise niedrig.

7.2.5 Folgerungen für die Praxis

Die betontechnischen Einflussfaktoren haben zwar keinen nachweisbaren Einfluss auf die Höhe des kritischen Chloridgehalts an der Stahloberfläche [Bre1], sie beeinflussen jedoch maßgeb-

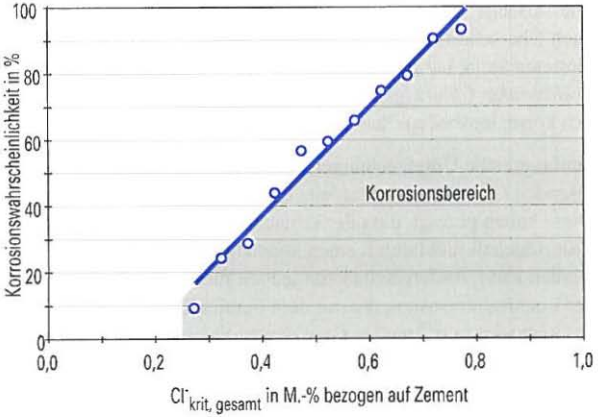


Bild II.7.2-5: Korrosionswahrscheinlichkeit für die Startbedingungen der Lochfraßkorrosion [Bre1]

lich den Penetrationsprozess der Chloridionen in den Beton (s. Abschnitt II.7.2.3). Deshalb sind aus Gründen der Dauerhaftigkeit im Hinblick auf die chloridinduzierte Korrosion Betone mit entsprechend dichtem Porengefüge, d. h. mit möglichst niedrigen Diffusionskoeffizienten, vorzusehen. Um die Zeitdauer bis zum Eintritt der Depassivierung der Stahloberfläche darüber hinaus zu verlängern, sind ausreichend große Betonüberdeckungen – entsprechend der geplanten Nutzungsdauer des Bauteils – schon bei der Planung zu berücksichtigen. Dieser Maßnahmenkatalog gilt analog für Bauteile, bei denen mit Bewehrungskorrosion infolge Carbonatisierung zu rechnen ist.

In E DIN 1045-1 wird die Mindestbetondeckung für Betonstahl bzw. Spannstahl festgelegt (s. **Tafel II.7.2-1**). E DIN 1045-2

Tafel II.7.2-1: Mindestbetondeckung c_{min} nach E DIN 1045-1

		durch Carbonatisierung verursachte Korrosion			durch Chloride verursachte Korrosion
Expositionsklasse		XC1	XC2/XC3	XC4	XD1, XD2, XD3 XS1, XS2, XS3
Mindest-betondeckung in mm	Betonstahl	10	20	25	40
	Spannstahl	20	30	35	50

Tafel II.7.2-2: Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton bei Gefahr der Bewehrungskorrosion infolge Carbonatisierung bzw. Chloridangriff nach E DIN 1045-2

	durch Carbonatisierung verursachte Korrosion				durch Chloride verursachte Korrosion		
Expositionsklasse	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
höchstzulässiger w/z-Wert[1)]	0,75		0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
Mindestfestigkeits-klasse[2)]	C16/20		C20/25	C25/30	C30/37[2)]	C35/45[2)]	C35/45[2)]
Mindestzementgehalt ohne Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	240		260	280	300	320[3)]	320[3)]
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	240		240	270	270	270	270

[1)] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k · Zusatzstoff)-Wert) maßgebend.

[2)] Wenn aufgrund der Expositionsklasse XF2 bis XF4 ein Luftporenbeton gefordert ist, kann eine Festigkeitsklasse niedriger verwendet werden.

[3)] Für massige Bauteile (> 80 cm) gilt: 300 kg/m³ Zement.

nennt die Mindestanforderungen an die Zusammensetzung von korrosionsgefährdeten Betonbauteilen, insbesondere die höchstzulässigen Wasserzementwerte und die Mindestzementgehalte zur Vermeidung von Bewehrungskorrosion (s. Abschnitte II.2.1 und II.3.3). Dadurch wird die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen in Bezug auf Bewehrungskorrosion sichergestellt. Bindemittelbedingte Unterschiede im Widerstand gegenüber der Carbonatisierung bzw. dem Chloridangriff bleiben unter diesen Voraussetzungen ohne praktische Bedeutung. **Tafel II.7.2-2** beinhaltet eine Zusammenstellung der Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton bei Gefahr der Bewehrungskorrosion infolge Carbonatisierung (Expositionsklassen XC1 bis XC4, s. Tafel IV.3-1) bzw. Chloridangriff (Expositionsklassen XD1 bis XD3 und XS1 bis XS3, s. Tafel IV.3-1). Neben den genormten Zementen sind auch für den entsprechenden Anwendungsfall bauaufsichtlich zugelassene Zemente verwendbar.

Um spätere Korrosionsschäden bereits in der Planungsphase auszuschalten, werden derzeit Möglichkeiten erarbeitet, neben der bisherigen Lastbemessung auch eine *Dauerhaftigkeitsbemessung* durchzuführen (s. Abschnitt II.3.3) [Sch11, Bam1, Geh2].

7.3 Chemischer Angriff

7.3.1 Betonkorrosion durch lösende Angriffe

In vielen Anwendungsbereichen können saure Flüssigkeiten (pH-Wert < 7,0) auf Betonbauwerke einwirken. Häufig anzutreffen sind in der Natur kohlensaure Grund- oder Oberflächenwässer, aber auch Huminsäuren, z. B. in *Moorwässern*. Damit beaufschlagt werden z. B. Gründungsbauwerke wie Fundamente, „Weiße Wannen", Großbohrpfähle, Verpressanker, aber auch Abwasserleitungen auf ihrer Außenseite. Auch in Wasser gelöste

Gase wie CO_2, SO_2 oder Cl_2 bilden *Säuren*, die z. B. auf Außenbauteile wie Schornsteinköpfe oder Kühltürme einwirken können. Man spricht von einem „lösenden" Angriff. Als lösend werden auch Reaktionen mit Salzlösungen betrachtet, die Ammoniumionen (NH_4^+) oder Magnesiumionen (Mg^{2+}) enthalten.

Sehr starke lösende Angriffe können dort auftreten, wo konzentrierte anorganische Säuren, z. B. Salzsäure (HCl), oder organische Säuren, z. B. Essigsäure (CH_3COOH), in großer Menge auf Betonbauteile einwirken können, wie z. B. in Auffangbauwerken der chemischen Industrie (s. Abschnitt II.13.7), oder durch unplanmäßige Einleitung solcher Säuren in die Kanalisation. *Niederschlagswasser („Saurer Regen")* gehört nicht zu den betonangreifenden Stoffen (s. Abschnitt II.7.4.2). Die ebenfalls zu den chemischen Angriffen zählende Beaufschlagung mit *Sulfat*ionen (SO_4^{2-}), ruft ggf. eine *treibende Reaktion* hervor und wird im Abschnitt II.7.3.3 behandelt.

Grundsätzlich bedingt der chemische Aufbau der Hydratationsprodukte, dass Zementstein von Säuren gelöst wird (s. Abschnitt I.5.8). Dort, wo er im Bauteil gelöst wird, geht die Festigkeit des Baustoffs verloren. **Bild II.7.3-1** zeigt die langfristige Entwicklung der *Schädigungstiefe* durch einen Säureangriff nach Entfernung der Reaktionsprodukte. Da dieser lösende Angriff jedoch nur von der Bauteiloberfläche aus erfolgen kann, hängt die dauerhafte Gebrauchsfähigkeit eines Bauteils davon ab, ob die Schädigungstiefe innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer von z. B. 50 oder 100 Jahren kleiner bleibt als ein geplanter Grenzwert. Benötigt wird demnach für jeden Angriff eine Prognose über den zeitlichen Verlauf des Reaktionsvorgangs in Form einer Schädigungs- oder *Abtragsrate* in der Dimension „Schichtdicke / Zeit". **Tafel II.7.3-1** zeigt die maßgeblichen Einflussgrößen für die Stärke des Angriffs und für den Widerstand

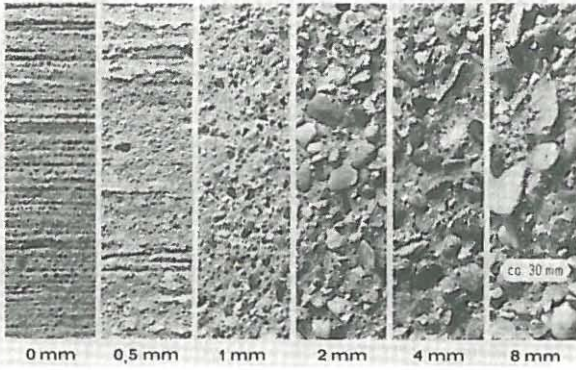


Bild II.7.3-1: Betonoberflächen mit unterschiedlicher Abtragstiefe

des Betons. Es handelt sich um eine Planungsaufgabe, für die zunächst die Regelungen gemäß E DIN 1045-1 und E DIN 1045-2 eine überschlägliche Lösung anbieten.

Tafel II.7.3-1: Einflussgrößen auf Angriff und Widerstand bei Einwirkung von Säuren auf Beton

der Angriff wird verstärkt durch	der Widerstand wird verstärkt durch
• steigende Säurekonzentration c	• einen niedrigen Anteil löslicher Bestandteile im Beton ($a_s < a_t$)
• schnellere Erneuerung der sauren Lösung an der Grenzschicht Beton/Flüssigkeit („Transportbedingungen")	• Bildung einer dauerhaften Schutzschicht aus Reaktionsprodukten mit niedrigem Diffusionskoeffizienten („Transportbedingungen")
• erhöhte Temperatur • erhöhten Druck	• einen hohen Ca^{++}-Gehalt (m_s) im dichten Zementstein (niedriger w/z-Wert)

7.3.2 Folgerungen für die Praxis bei lösendem Angriff

Als Erstes sind die Inhaltsstoffe des Wassers gemäß E DIN 1045-2 und DIN 4030 Teil 1 und Teil 2 zu ermitteln, mit denen das Bauteil ständig beaufschlagt wird. Dies erfolgt ggf. im Rahmen des Baugrundgutachtens. Aufgrund der Ergebnisse (pH-Wert, NH_4^+-, Mg^{2+}- Gehalt, Gehalt an *kalklösender Kohlensäure* CO_2 sowie Säuregrad des Bodens) erfolgt eine Einstufung des Angriffs in die *Expositionsklassen* XA1 (schwach), XA2 (mäßig) und XA3 (stark) (s. **Tafeln II.7.3-2** bzw. IV.3-3). Die gesonderte Beurteilung von kalkangreifender Kohlensäure unabhängig vom pH-Wert ist erforderlich, weil der Dissoziationsgrad dieser Säure gering und der pH-Wert deshalb kein hinreichendes Maß für die Konzentration ist. Dies gilt auch für andere schwach dissoziierte Säuren, wie Essigsäure, Milchsäure usw. Die erforderlichen Maßnahmen, die zu einem ausreichenden Widerstand des Betons führen, sind aus **Tafel II.7.3-3** bzw. IV.3-16 zu entnehmen. Sie betreffen die Dichtheit und Festigkeit des Betons in Form des höchstzulässigen w/z-Werts, des Mindestzementgehalts und der Mindestfestigkeitsklasse, u. U. auch die Zementart.

Es ist verständlich, dass diese pauschale Beurteilung nur unter eingrenzenden Bedingungen gelten kann: Sie gilt nur für Wässer natürlicher Zusammensetzung mit Temperaturen zwischen 5 °C und 25 °C mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten. Es gilt der höchste *Angriffsgrad*, der in einem Feld der Tafel II.7.3-2 erreicht wird. Liegen zwei oder mehrere Werte im oberen Viertel eines Bereichs (beim pH-Wert im unteren Viertel), so erhöht sich der Angriffsgrad um eine Stufe, ausgenommen bei Meerwasser und Niederschlagswasser. *Meerwasser* wird grundsätzlich in die Expositionsklasse XA2 eingeordnet, Niederschlagswasser gehört nicht zu den betonangreifenden Stoffen (s. Abschnitt II.7.4.2). Der Angriff kann sich verringern, wenn wenig durchlässige Böden anstehen, z. B. mit einem Durchlässigkeitsbei-

Tafel II.7.3-2: Expositionsklassen nach E DIN 1045-2

		Expositionsklassen		
	Prüfverfahren	XA1	XA2	XA3
Chemisches Merkmal		schwach angreifend	mäßig angreifend	stark angreifend
SO_4^{2-} mg/l in Wasser	DIN EN 196-2 DIN 4030-2	≥ 200 und ≤ 600	≥ 600 und ≤ 3000	> 3000 und ≤ 6000
SO_4^{2-} mg/l im Boden[1] insgesamt	DIN EN 196-2[2]	≥ 2000 und ≤ 3000[3]	> 3000[3] und ≤ 12000	> 12000 und ≤ 24000
ph-Wert des Wassers	DIN 4030-2	≤ 6,5 und ≥ 5,5	< 5,5 und ≥ 4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
Säuregrad des Bodens in ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully		
CO_2 mg/l kalklösend im Wasser	DIN 4030-2	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100
NH_4^+ mg/l in Wasser	ISO 7150-1: 1994 ISO 7150-1: 1984 oder DIN 4030-2	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
Mg^{2+} mg/l in Wasser	ISO 7980: 1986 oder DIN 4030-2	≥ 300 und ≤ 1000	> 1000 und ≤ 3000	> 3000

[1] Tonböden mit einer Durchlässigkeit von weniger als 10^{-5} m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden.

[2] Das Prüfverfahren beschreibt die Auslaugung von SO_4^{2-} durch Salzsäure; Wasserauslaugung darf statt dessen angewandt werden, wenn am Ort der Verwendung des Betons Erfahrung hierfür vorhanden ist.

[3] Falls die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Beton – zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen – besteht, ist der Grenzwert von 3000 mg/l auf 2000 mg/l zu vermindern.

[4] Gülle kann unabhängig vom NH_4-Gehalt in die Expositionsklasse XA1 eingeordnet werden.

Tafel II.7.3-3: Anforderungen an die Betonzusammensetzung nach E DIN 1045-2 und DAfStb-Richtlinie Verwendung von Flugaschen nach DIN EN 450 im Betonbau [Ri12]

	Expositionsklasse		
	XA1	XA2	XA3[5]
höchstzulässiger w/z-Wert[1]	≤ 0,60	≤ 0,50	≤ 0,45
Mindestfestigkeitsklasse	C 25/30	C 35/45[2]	C 35/45[2]
Mindestzementgehalt ohne Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	280	320[3][4]	340[3]
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	270[3]	270[3][4]	270[3]

[1] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k · Zusatzstoff)-Wert) maßgebend.

[2] Wenn aufgrund der Expositionsklasse XF2 bis XF4 ein Luftporenbeton gefordert ist, kann eine Festigkeitsklasse niedriger verwendet werden.

[3] HS-Zement bei Sulfatangriff

[4] bis $SO_4^{2-} \leq 1500$ mg/l auch Mischung aus Zement + Flugasche einsetzbar } außer Meerwasser

[5] Oberflächenschutz oder Gutachten

wert $k < 10^{-5}$ m/s. Für die Expositionsklasse XA3 sind nach E DIN 1045-2 Schutzmaßnahmen vorzusehen, wenn nicht durch ein auf die Baumaßnahme bezogenes Gutachten eine andere Lösung vorgeschlagen wird.

Für die Bewertung des chemischen Angriffs innerhalb von Abwasserrohren aus Beton, z. B. durch sehr saures kommunales *Abwasser*, eignet sich DIN 4030 nicht [Nec1]. Die in der Norm vorausgesetzten Randbedingungen, z. B. geringe Fließgeschwindigkeit, Beständigkeit der gebildeten Schutzschichten, sind üblicherweise im Abwasserkanal nicht gegeben. Eine für diesen Bereich geltende Regelung zur qualitativen Beurteilung des chemischen Angriffs enthält das ATV-Merkblatt M168 „Korrosion von Abwasseranlagen" [Me3]. Wenn die Einleitungsbedingungen beachtet werden, sind die Abwässer nicht oder schwach betonangreifend. Aufgrund von Missbrauch, Fehlbedienung, Störfällen oder längerfristigem Umbau technischer Einrichtungen können die Grenzwerte erheblich überschritten werden, insbesondere z. B. auch durch starke Säuren. Langjährige Betriebserfahrungen über Art und Intensität der möglichen Säureangriffspotentiale im kommunalen Abwasser einerseits und Kenntnisse über den Widerstand hochwertiger Betone gegenüber Säuren andererseits ermöglichten es, eine Stufenregelung für mäßige und starke Angriffe ohne äußeren Schutz der Rohre anzugeben. Danach sind auch sehr hohe einwirkende Ionen- oder Säurekonzentrationen möglich, wenn dies zeitlich befristet und nicht zu häufig geschieht. Qualitativ gute Rohrbetone besitzen den notwendigen chemischen Widerstand, um den aus diesen Einwirkungen resultierenden Beanspruchungen über die vorgesehene Nutzungsdauer des Kanals, z. B. 80 bis 100 Jahre, ausreichend zu widerstehen.

Zudem sind im ATV-M168 für Sonderfälle im Kanalnetz, wo längerfristig Abwässer aus Gewerbe und Industrie mit pH-Wer-

ten bis 4,5 abgeleitet werden, besondere Anforderungen an den Rohrbeton im Hinblick auf einen notwendigen erhöhten chemischen Widerstand zusammengestellt. Die Forderungen zielen darauf ab, durch eine höhere Dichtheit des Betongefüges sowie eine Erhöhung des Anteils nicht löslicher Bestandteile und schwer löslicher Hydratationsprodukte einen größeren Säurewiderstand herzustellen.

Für lösende Angriffe durch *Ammonium-* und *Magnesiumionen* kann davon ausgegangen werden, dass die Grenzwerte in Tafel II.7.3-2 nach dem heutigen Kenntnisstand eine sehr ungünstige Beurteilung des möglichen Angriffs darstellen. Deshalb wird hier lediglich auf entsprechende Literatur verwiesen [Näg1, Hil1, Rec1, Rec2, Knö1] und für sehr hohe Konzentrationen empfohlen, ein auf die Baumaßnahme bezogenes Gutachten einzuholen.

Eine gesonderte Beurteilung ist durch Gutachten überall dort zu empfehlen, wo für den äußeren Schutz hohe Kosten anfallen oder eine Schutzmaßnahme praktisch unmöglich ist, wie z. B. bei Großbohrpfählen oder Verpressankern. Die Beurteilung hat zum Ziel, die zeitliche Entwicklung der Schädigungs- oder Abtragstiefe zu prognostizieren und so eine „Bemessung" des Bauteils für den vorliegenden Angriff und die planmäßige Nutzungsdauer zu ermöglichen.

Die nachfolgende Darstellung bezieht sich auf kalklösende Kohlensäure, kann jedoch entsprechend auf alle organischen und anorganischen Säuren angewendet werden (s. Abschnitt II.13.2). Zugrunde gelegt wird ein Modell von Angriff und Widerstand, dessen Einflussgrößen in Tafel II.7.3-1 angegeben sind.

Die Modellbildung beruht auf der ungünstigen Annahme, dass die angreifende Lösung sich ständig erneuert und ihr Lösungspotential nicht durch gelöste Stoffe vermindert wird. Es wird

angenommen, dass eine in Wasser lösliche Calciumverbindung entsteht und nicht etwa wie beim Angriff durch Schwefelsäure ein schwer lösliches Reaktionsprodukt (Gips) den weiteren Angriff bremst. **Bild II.7.3-2** zeigt den Angriffsmechanismus durch kalklösende Kohlensäure. Die Ausgangssituation (1) ist durch die angreifende Lösung und die unbeanspruchten Hydratationsprodukte (Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$, Calciumsilicathydrat CSH und Calciumaluminatferrithydrat C(A, F)H) gekennzeichnet. Die sich bildende Reaktionszone (2) zeigt die erste Umwandlung des $Ca(OH)_2$ in Calciumcarbonat $CaCO_3$ sowie den ersten Abtransport von Calcium als Calciumhydrogencarbonat $Ca(HCO_3)_2$ durch Auflösung von $CaCO_3$ und Zementhydraten. Der dritte Schritt (3) ist dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionszone mit der Dicke dx weiter ins Innere des Zementsteins fortschreitet und eine gelartige Schicht mit zunehmender Dicke x aus unlöslichen Restprodukten des Zementsteins zurückbleibt. Da die Gelschicht einen höheren Diffusionswiderstand aufweist als Wasser, erzwingt sie, wenn sie nicht mechanisch entfernt wird, eine zunehmende Verlangsamung des Reaktionsprozesses. Sie wirkt als *„Schutzschicht"*. Dass diese Reaktion so abläuft, wurde von Koelliker [Koe1] nachgewiesen. Daraus konnten sogar Anhaltswerte für den Diffusionswiderstand der Gelschicht abgeleitet werden.

Auf dieser Basis wurde ein Diffusionsmodell [Gru5, Gru6] aufgestellt, mit dem die Abtragsraten aus dem Gleichgewicht zwischen dem gelösten und dem abtransportierten CaO berechnet werden können. In die Berechnung der Schädigungstiefe x in Abhängigkeit von der Zeit t gehen folgende Einflussgrößen nach Tafel II.7.3.-1 ein: Die Säurekonzentration c, der lösliche Flächenanteil a_s in der Gesamtangriffsfläche a_t sowie die Masse m_s löslicher Bestandteile pro Volumeneinheit. Untersuchungen

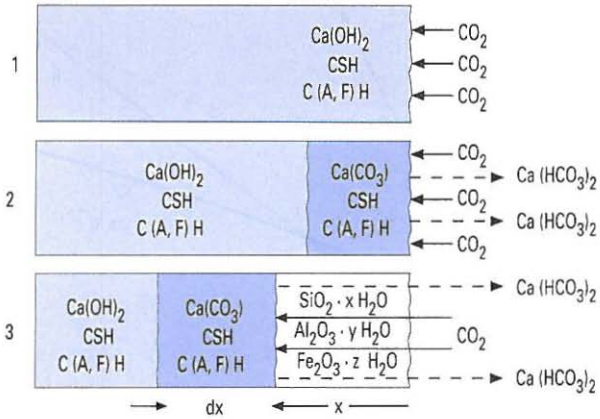


Bild II.7.3-2: Wirkung kalkangreifender Kohlensäure auf Zementstein (Modell für 3 Zeitstufen in Folge)

der verschiedensten Art zeigen, dass das $\sqrt{t}$-Modell den Lösungsvorgang durch kalklösende Kohlensäure mit ungestörter Schutzschicht sehr gut beschreibt [Fri1, Loc8, Koe1].

Bei ständiger Entfernung der *Schutzschicht* geht der Abtrag wesentlich schneller vor sich, so als würde der bei vorhandener Schutzschicht mit $\sqrt{t}$ verlaufende Vorgang in längeren oder kürzeren Intervallen jeweils erneut ohne Schutzschicht beginnen. **Bild II.7.3-3** zeigt, dass der Abtragsvorgang dann quasi linear verläuft. Praktische Bedeutung hat diese Abtragsart z. B. in großen Gerinnen oder Behältern mit turbulent strömendem Wasser.

Entsprechend den beschriebenen Vorgängen zeigt **Bild II.7.3-4** die Entwicklung der Abtrags- bzw. Schädigungstiefe bei ver-

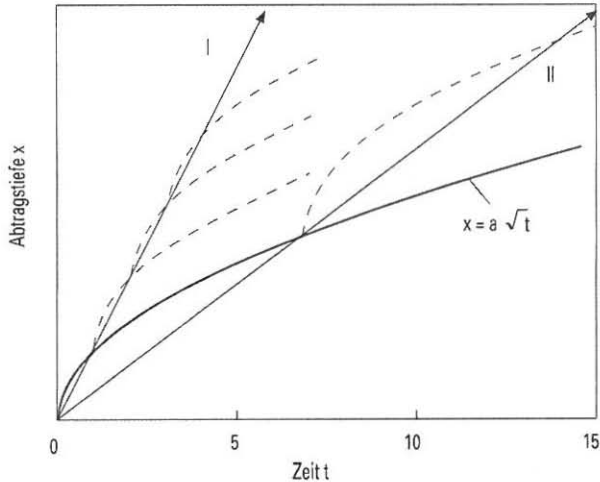


Bild II.7.3-3: Schematische Darstellung des Abtrags in Abhängigkeit von der Zeit. Ohne Entfernung der Gelschicht (Parabel), mit häufiger Entfernung der Gelschicht (Gerade I), mit weniger häufiger Entfernung der Gelschicht (Gerade II)

schiedenen „Transportbedingungen" und verschiedenen Säurekonzentrationen. Wesentlich an diesem Ergebnis ist, dass eine intakte Schutzschicht mehr bewirkt als Unterschiede in der Konzentration der kalklösenden Kohlensäure im angreifenden Wasser.

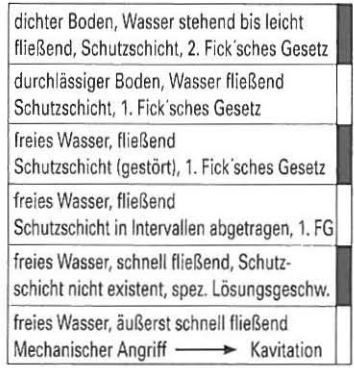
Zu ergänzen ist, dass die günstigen Eigenschaften in freier betonangreifender Lösung nur erzielt werden, wenn der

Zuschlag unlöslich ist. Kalkstein z. B. ist leichter löslich in Säuren als Zementstein und bildet keine Schutzschicht. Die löslichen Zuschläge öffnen demnach die angegriffene Fläche in Form von „Löchern", anstatt wie auf Bild II.7.3-1 zu sehen, den löslichen Zementstein und seine Schutzschicht in ihren „Fugen" zu schützen [Loc8].

Das Berechnungsmodell hat sich für alle Säureangriffe in wässriger Lösung als geeignet erwiesen. So konnte das Messergebnis für die Schädigungstiefe an einem Bohrkern, der drei Tage lang in 10%-iger Salzsäure gelagert wurde, zuverlässig mit 3 bis 4 mm vorausberechnet werden. Daraus ergab sich die Regelung, dass Auffangbehälter nach der DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen" [Ri2] während einer 3- oder 7-tägigen Belastungsdauer bis zur Entsorgung keines äußeren Schutzes bedürfen – obwohl die Behälter von der aufgefangenen Säure langfristig mehrfach aufgelöst werden könnten (s. Abschnitt II.13.2).

Mit dem Berechnungsmodell nicht erfasst werden Angriffe durch biogene Schwefelsäure, wie sie im Gasraum von Abwasserleitungen aus Beton auftreten können. Die Angriffe werden durch Bakterien hervorgerufen, die Schwefelwasserstoff (H_2S) zu Schwefelsäure aufoxidieren. Da Schwefelwasserstoff erst durch anaerobe Prozesse im Abwasserschlamm entsteht, ist das Auftreten von Schwefelwasserstoff ein Hinweis auf falsch geplante oder falsch betriebene Abwasserleitungen. Als hochgiftiges Nervengas stellt es eine große Gefahr für das Betriebspersonal dar. Seine Entstehung sollte deshalb vorbeugend durch geeignete Betriebsbedingungen unterbunden werden. Im äußersten Fall ist ein Schutz des Betons im Gasraum durch gasdichte Auskleidungen oder Beschichtungen möglich.

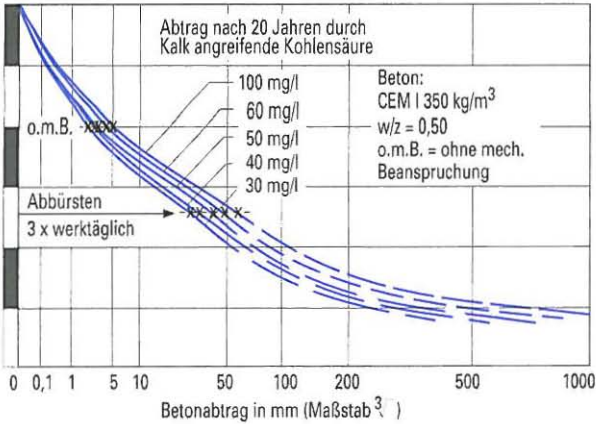
Bild II.7.3-4: Abtragstiefe bei Normalbeton nach 20 Jahren durch Kalk angreifende Kohlensäure in Abhängigkeit von den Transportbedingungen und der Konzentration



7.3.3 Betonkorrosion durch Sulfatangriff

In den Beton eindringende Sulfationen aus Wässern, Böden oder Gasen können mit Bestandteilen des Zementsteins chemisch reagieren und dabei zu einer *Betonkorrosion* durch Treiben oder Entfestigen führen (s. Abschnitt I.5.8.4). Die Größe des *Sulfatangriffs* ist von der Konzentration der Sulfatlösung abhängig [Wis1]. Prinzipiell steigt das Angriffspotential einer Sulfatlösung mit ihrer Konzentration, so dass in E DIN 1045-2 drei *Expositionsklassen* entsprechend der Sulfationenkonzentration des anstehenden Wassers unterschieden werden (Tafel II.7.3-2). Fließende Gewässer greifen den Beton stärker an als stehende Gewässer, da durch den Wassertransport immer neue Sulfationen zur chemischen Reaktion im Beton zur Verfügung stehen.

Obwohl *Meerwasser* nach Tafel II.7.3-2 in die Expositionsklasse XA2 einzuordnen ist, sind Schäden infolge eines reinen Sulfat-



angriffs auch ohne Verwendung eines *HS-Zements* mit hohem Sulfatwiderstand nicht bekannt. Zurückzuführen ist dies auf die hohe Chloridkonzentration, die den Sulfatangriff hemmt, und auf die Ausfällungen von Calciumcarbonat durch Reaktion des im Meerwasser gelösten Calciumhydrogencarbonats mit dem Calciumhydroxid aus der Porenlösung des Betons, wodurch das Eindringen von Sulfationen behindert wird [Spr7].

In natürlichen Böden können vor allem Eisensulfide und *austauschfähige Salze* auftreten. Mit einer Sulfatbelastung des Bodens ist insbesondere dort zu rechnen, wo aufgrund der geologischen Entwicklung Gips-, Anhydrit- oder Salzformationen anstehen. Grenzwerte für die Sulfatkonzentration in Böden sind in E DIN 1045-2 angegeben (Tafel II.7.3-2). Generell sind nichtbindige Böden für einen Sulfatangriff kritischer zu sehen als bindige, da durch die Wasserdurchlässigkeit der Bodenart betonan-

greifende Bestandteile im Grundwasser ständig neu zugeführt werden können.

Die in Abgasen auftretenden Schwefeloxide bilden entsprechend der Abgaszusammensetzung im Kondensat Schwefelsäure, die nach einer Neutralisation Sulfat bilden. Speziell in Schornsteinen, Kühltürmen oder Filterkammern, aber auch in Kanalisationen können die Abgase Auslöser für einen Sulfatangriff sein. Übliche SO_2-Konzentrationen in der Luft industrienaher Bereiche reichen für einen Sulfatangriff auf zementgebundene Baustoffe nicht aus [Knö1].

7.3.4 Folgerungen für die Praxis bei treibendem Angriff

Überschreiten die Sulfationen im einwirkenden Medium die Grenzwerte nach E DIN 1045-2 (s. Tafel II.7.3-2), ist für eine hohe Dauerhaftigkeit die Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand erforderlich. Die Herstellung eines hohen *Sulfatwiderstands* beruht auf zwei Maßnahmen: Die erste vermindert die Diffusion von Sulfationen im Beton durch Herabsetzung des w/z-Werts und verlängert damit die Einleitungsphase bis zum Sulfatangriff. Die zweite begrenzt die Menge der reaktionsfähigen Bestandteile im Zement durch die Verwendung von HS-Zement und begrenzt damit die Treibreaktion (s. Bild II.7.2-1) [Sch12]. Entsprechend der Einordnung in eine Expositionsklasse sind aufgrund von langjährigen baupraktischen Erfahrungen betontechnologische Mindestanforderungen an die Betonzusammensetzung in E DIN 1045-2 festgeschrieben worden (s. Tafel II.7.3-3).

HS-Zemente nach DIN 1164-1 sind für die Expositionsklassen XA2 und XA3 außer für Meerwasser vorgeschrieben. Bei einem SO_4^{2-}-Gehalt des angreifenden Wassers bis zu 1500 mg/l dürfen anstelle von HS-Zementen auch Portland- (CEM I), Portlandölschiefer- (CEM II-T), Portlandhütten- (CEM II-S), Portlandkalkstein- (CEM II/A-L) sowie Hochofenzement mit < 65% Hütten-

sandgehalt (CEM III/A) nach DIN 1164-1 zusammen mit Flugasche als Betonzusatzstoff verwendet werden. Bei Verwendung von Portlandölschiefer- (CEM II-T) und Hochofenzement mit < 65% Hüttensandgehalt (CEM III/A) müssen vom Gesamtbindemittelgehalt mindestens 10 M.-% und bei allen anderen genannten Zementen mindestens 20 M.-% Flugasche zugegeben werden.

7.4 Hydrolyse

7.4.1 Reaktionsabläufe

Hydrolyse nennt man die durch Wasser hervorgerufene Spaltung chemischer Verbindungen. Unter sehr ungünstigen Bedingungen können beim ständigen Kontakt mit Wasser auch Bestandteile des Zementsteins gelöst werden.

Bei der Hydratation der Calciumsilicate C_3S und C_2S zu Tricalciumsilicathydrat wird Calciumhydroxid in großer Menge gebildet (rd. 25 bis 30 M.-% der Hydratationsprodukte eines technischen Zements) und in die Struktur eingelagert [Kei2]. Unabhängig von der Anwesenheit von Alkalien sorgt dieses Calciumhydroxid für einen hohen pH-Wert $\geq 12{,}5$ in der Porenlösung (s. Abschnitt II.7.2) Calciumhydroxid ist das am leichtesten lösbare Hydratationsprodukt im Zementstein.

Wenn Betonoberflächen ständig mit sehr weichem Wasser, z. B. mit deionisiertem Wasser, beaufschlagt werden, wird die Konzentration der Porenlösung an der Betonoberfläche verdünnt. Um den Verlust auszugleichen, kann festes Calciumhydroxid in Lösung gehen. Langfristig wird dann der Zementstein „ausgelaugt". Dies gilt umso mehr, wenn das sehr weiche Wasser belüftet ist und durch die gelöste Luftkohlensäure u. U. nicht im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht steht. Dann können in sehr langer Zeit alle Hydratationsprodukte entkalkt werden, und nur die unlöslichen Bestandteile wie SiO_2 und Fe_2O_3

bleiben zurück (s. **Bild II.7.4-1)**. Es handelt sich dann streng genommen um einen sehr schwachen Säureangriff (s. Abschnitt II.7.3). Typisch dafür ist eine leichte Braunfärbung der Oberfläche durch das im Zement enthaltene Eisen, insbesondere bei grauen Zementen. In einer Zwischenstufe werden alle Ca-haltigen Phasen durch das in belüftetem deionisiertem Wasser immer vorhandene CO_2 in Calciumcarbonat umgewandelt. Beide Schichten wirken als Schutzschichten und behindern das Fortschreiten der Auslaugung. Das „Depot" an Calciumhydroxid, aber auch nicht hydratisierte Klinkerreste im nicht beeinflussten Zementstein bewirken, dass ein ins Gewicht fallender Abtrag an Bauwerken in der Praxis nicht stattfinden kann. Dies gilt erst recht für den „Normalfall", in dem Betonbauteile mit mittelharten bis harten Wässern (Trinkwasser) beaufschlagt werden, wo keine Hydrolyse stattfindet.

Bild II.7.4-2 zeigt dazu den Masseverlust von Zementmörtelplättchen, 50 × 50 × 4 mm, die in Leitungswasser (pH 7,5, 15° dH) und in deionisiertem Wasser (pH 6, 0° dH) gelagert wurden. Ein Teil der Proben wurde fünfmal pro Woche abgebürstet. Im belüfteten deionisierten Wasser ohne Abbürsten zeigt sich nach der anfänglichen Wasseraufnahme, dass sich nach längerer Zeit der im Bild II.7.4-1 dargestellte Lösungsvorgang einstellt. Mit Abbürsten schreitet der Abtrag linear mit der Zeit fort, anfangs schneller bis zum Abtrag der obersten Zementhaut, dann langsamer, sobald der unlösliche Zuschlag zum ersten Mal freigelegt ist.

Im mittelharten Leitungswasser, das sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet, findet kein Abtrag statt. Die Erklärung liegt darin, dass unter diesen Verhältnissen Caciumcarbonat (Calcit) an der Baustoffoberfläche abgeschieden wird, sobald das Wasser mit dem Calciumhydroxid des Zementsteins in Kontakt kommt [Roh1].

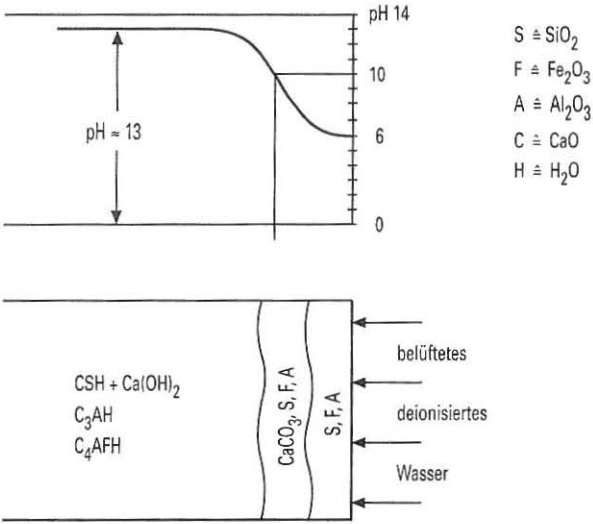


Bild II.7.4-1: Verlauf des pH-Werts (schematisch) und Reaktionsprodukte durch Einwirkung von belüftetem deionisiertem Wasser auf Beton

7.4.2 Auswirkungen auf Betonbauteile und Folgerungen für die Praxis

Wenn die Reaktionsschicht auf Betonbauteilen häufig abgetragen wird, z. B. durch Hochdruckwasserstrahl, wird die Hydrolyse verstärkt. Die Folge ist eine zunehmende Aufrauung der Oberfläche. Da dies z. B. in Trinkwasserbehältern unerwünscht ist, sollten die Flächen nicht mit Hochdruckwasserstrahl gereinigt werden – schon gar nicht unterstützt durch saure Reini-

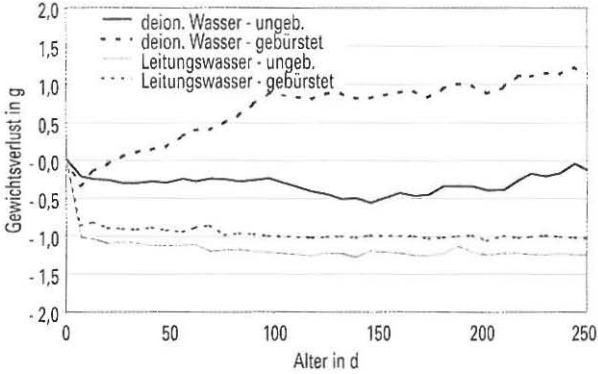


Bild II.7.4-2: Masseverlust von Zementmörtel-Plättchen 50 x 50 x 4 mm, w/z = 0,60, bei Einlagerung in deionisiertes Wasser (pH 6; 0 °dH) und Leitungswasser (pH 7,5; 15 °dH), ungebürstet und fünfmal pro Woche gebürstet

gungsmittel. Außerdem ist hier von vornherein ein ausreichend dichter Zementstein herzustellen, der durch einen Wasserzementwert w/z ≤ 0,50 gekennzeichnet ist. Bei üblichem Trinkwasser, das sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet, findet in den trinkwasserberührten Bauteilen kein Abtrag statt. Bei Trinkwasser, das mit hoher Strömungsgeschwindigkeit ständig auf eine nur wenige Millimeter dicke Zementmörtelbeschichtung z. B. in Stahlrohren einwirkt, ist besonders darauf zu achten, dass sich das Wasser im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet (s. DIN 2880 und Abschnitt II.14.4).

Betonkonstruktionen können durch Hydrolyse in ihrer Standsicherheit auch in Jahrzehnten selbst dann nicht beeinträchtigt werden, wenn weiches, weitgehend im Kalk-Kohlensäure-

Geichgewicht stehendes Wasser mit hoher Geschwindigkeit strömt [Wal4, Wal5]. So wurden an Betonplatten mit $w/z \leq 0{,}6$, die in sehr weichem Wildwasser mit nur rd. 3° dH 29 Jahre lang ausgelagert waren, nur Abtragstiefen von wenigen Millimetern ermittelt. [Wal5]

Bei sehr weichen Kühlwässern, die im Kreislauf gefahren werden, ist die mit der Auslaugung verbundene Aufhärtung des Wassers gegebenenfalls zu berücksichtigen. Um eine solche Aufhärtung des Wassers im Kühlwasserkreislauf zu unterbinden, werden hier die Betonoberflächen erforderlichenfalls mit einer Kunststoffbeschichtung versehen.

Das in der Regel sehr weiche und durch in der Luft enthaltenes CO_2 und SO_2 auch saure Regenwasser („Saurer Regen") mit pH-Werten um 4 hat trotz oft gehörter Behauptungen keinen schädigenden Einfluss auf Betonbauwerke [Gru6]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Lösungspotential in diesem sehr weichen Wasser klein ist und dass die verfügbaren Wassermengen, die auf eine Bauteilfläche einwirken, auch auf ein Jahrhundert betrachtet, sehr gering sind im Verhältnis zu ständigem Wasserkontakt eines Bauteils. Außerdem wird Regenwasser beim Auftreffen auf z. B. horizontale Bauteile durch den vorhandenen Staub praktisch neutralisiert, so dass z. B. Abflussleitungen gar nicht mit kalkangreifendem Regenwasser beaufschlagt werden können.

7.5 Verschleiß

7.5.1 Beanspruchung

Beton, der auf seiner Oberfläche besonders starker mechanischer Beanspruchung ausgesetzt wird, muss einen hohen *Verschleißwiderstand* aufweisen. Diese Verschleißbeanspruchung kann durch schleifenden und rollenden Verkehr (z. B. auf Fahrbahn-,

Hallenböden), durch rutschendes Schüttgut (z. B. in Silos), durch stoßartige Bewegungen von schweren Gegenständen (z. B. Werkstätten, Verladerampen) oder durch stark strömendes und Feststoffe führendes Wasser hervorgerufen werden. Beton mit zu geringem Verschleißwiderstand kann durch einen gleichmäßigen Abtrag oder örtliche Vertiefungen an der Betonoberfläche geschädigt werden.

Bei schleifender Beanspruchung können feinkörnige Betonbestandteile – abhängig von der Reibung und der Rauigkeit der Berührungsflächen – herausgerissen werden. Diese Beanspruchung führt zu einem Abtrag der Oberfläche. Bei einer rollenden Beanspruchung durch Fahrbetrieb mit gummibereiften Rädern (weich) bzw. mit Kunststoffreifen (hart) entsteht insbesondere bei harten Rädern ein reibender und stoßender Angriff auf die Betonoberfläche. Dadurch können einzelne Zuschlagkörner im Gefüge gelockert werden und herausbrechen.

Eine schlagende Beanspruchung wird durch den Anprall eines Gegenstands auf die Betonoberfläche verursacht. Dabei wird der weichere Zementstein angegriffen, die Zuschlagkörner werden allmählich freigelegt und schließlich aus ihrer Einbettung herausgelöst. Im Wasserbau kann es neben der schleifenden und schlagenden Beanspruchung durch mitgeführte Feststoffe in strömendem Wasser auch zu Kavitation kommen [Wal6]. Strömt Wasser mit einer Geschwindigkeit von mehreren Metern pro Sekunde parallel über eine Begrenzungsfläche, so ruft jede geometrische Veränderung der Begrenzung ein Ablösen der Strömung und damit lokale Unterdruckbereiche an der Begrenzungsfläche hervor. Unterschreitet der statische Unterdruck des strömenden Wassers den Dampfdruck, entstehen wasserdampfgefüllte Bläschen. Bei einem anschließenden Druckanstieg kondensieren diese Bläschen und brechen schlagartig zusammen. Die ausgelösten Druck- und Stoßwellen können zu einer all-

mählichen Zerstörung der benachbarten festen Betonoberfläche führen.

7.5.2 Prüfmethoden

Ein allgemein anwendbares Prüfverfahren (**Tafel II.7.5-1**), [Kun1] zur unmittelbaren Bestimmung des Verschleißverhaltens von Beton hat sich bisher nicht durchgesetzt, weil sich die Ergebnisse der bestehenden unterschiedlichen Prüfverfahren nur bedingt auf das Verhalten des Betons unter den verschiedenen praktischen Beanspruchungen übertragen lassen. E DIN 1045-2 und die für den Betonstraßenbau maßgebende

Tafel II.7.5-1: Übersicht der verschiedenen Prüfverfahren

Prüfverfahren	Beanspruchung	Prüfablauf
Schleifscheiben-Verfahren (Böhme-Scheibe, DIN 52108)	schleifend	Probekörper wird auf rotierende Schleifscheibe gedrückt, auf die ein Schleifmittel gestreut wird
Stachelwalzen-Verfahren ASTM-C-779-95	schleifend	Probekörper wird auf rotierende Stachelwalzen aus Stahl gedrückt
Kugeldruck-Verfahren (Ebner-Verfahren) ASTM-C-779-95	schleifend/ schlagend	Acht Stahlkugeln in einem Rotationsring werden auf Probekörper gepresst und in Rotation versetzt
Los-Angeles-Test ASTM-C-131-96 ASTM-C-535-96	prallend/ gleitend	Stahlkugeln werden mit Probekörper in einem rotierenden Zylinder bewegt
Sandstrahl-Verfahren ASTM-C-418-98	prallend	Strahlgut wird durch einen Luftstrom auf die Prüffläche aufgebracht

ZTV Beton-StB [Ri49] enthalten daher nur Hinweise zur erforderlichen Betonfestigkeitsklasse sowie zur Zusammensetzung und Herstellung des Betons. Wenngleich die verschiedenen Prüfverfahren für manche Fälle nicht genau der Praxisbeanspruchung entsprechen oder keine festen Grenzwerte vorliegen, können Betone hinsichtlich der Höhe des Verschleißwiderstands durch den Vergleich von Relativwerten beurteilt und eingestuft werden. Wegen der sehr unterschiedlichen Abnutzvorgänge sollte angestrebt werden, dass sich die jeweilige Prüfmethode und die tatsächliche Beanspruchung möglichst nahe kommen.

Für Betonwerksteine (DIN 18500) und Hartstoff-Estriche (DIN 18560) wird der Schleifverschleiß bei der Prüfung nach DIN 52108 (Schleifscheibe nach Böhme) begrenzt. Bei Betonwaren, wie z. B. Bordsteinen (DIN 438), Gehwegplatten (DIN 485) und Pflastersteinen (DIN 18501), wird auf diese Prüfung seit langem verzichtet, da die hohe Druckfestigkeit dieser Produkte auch einen hohen Verschleißwiderstand sicherstellt.

Für Pflaster- oder Betonfahrbahndecken ist neben dem hohen Verschleißwiderstand eine dauerhafte Griffigkeit für die Verkehrssicherheit von großer Bedeutung (s. Abschnitt II.12.3.3). Daher wird bei verschiedenen Prüfverfahren die Griffigkeit nach einer definierten Polierbeanspruchung bestimmt [Bon3, Me88]. In Skandinavien, wo Spikesreifen zulässig sind, werden Straßenbetone mit unterschiedlichen Oberflächentexturen und Zusammensetzungen in Rundlaufanlagen unter praxisnahen Randbedingungen geprüft [Ege1].

7.5.3 Folgerungen für die Praxis

Versuche und Praxiserfahrung haben gezeigt, dass die Druckfestigkeit die wichtigste Einzelgröße für den Verschleißwiderstand ist [Kun1, Dhi1, Wal7], wobei dieser mit der Druckfestigkeit zunimmt. E DIN 1045-2 (Tafel IV.3-16) fordert daher

Tafel II.7.5-2: Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton mit Verschleißbeanspruchung nach E DIN 1045-2

Anforderung	Expositionsklasse			
	XM1	XM2[4]		XM3[4]
höchstzulässiger w/z-Wert[1]	0,55	0,55	0,45	0,45
Mindestfestigkeitsklasse[2]	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45
Mindestzementgehalt[3] ohne Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	300	300	320	320
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³	270	270	270	270
andere Anforderungen	Zuschlag mit Regelanforderungen[5]			
	–	Oberflächenbehandlung	–	–

[1] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k · Zusatzstoff)-Wert) maßgebend.

[2] Wenn aufgrund der Expositionsklasse XF2 bis XF4 ein Luftporenbeton gefordert ist, kann eine Festigkeitsklasse niedriger verwendet werden.

[3] Für alle Festigkeitsklassen ≤C 55/67 Höchstwert z = 360 kg/m³.

[4] Die Nachbehandlungsdauer ist gegenüber den Festlegungen der Ausführungsnorm E DIN 1045-3 zu verdoppeln.

[5] Bei Verschleißbeanspruchung muss der Betonzuschlag bis 4 mm Größtkorn überwiegend aus Quarz oder aus Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand. Bei extremer Beanspruchung sind Hartstoffe nach DIN 1100 zu verwenden. Die Körner aller Zuschlagarten sollen eine mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben. Das Zuschlaggemisch soll möglichst grobkörnig sein.

für Beton mit Verschleißbeanspruchung eine Festigkeitsklasse von mindestens C 30/37 (**Tafel II.7.5-2**). Durch einen möglichst geringen Wasserzementwert nimmt die Druckfestigkeit des Zementsteins zu und auch das Verbundverhalten zwischen Zuschlag und Zementstein wird verbessert. Der Zementgehalt darf wegen des geringeren Abriebwiderstands des Zementsteins für Betone mit einer Festigkeitsklasse $\leq$ C 55/67 360 kg/m^3 nicht überschreiten. Das Zuschlaggemisch soll möglichst grobkörnig sowie sand- und hohlraumarm sein, um die erforderliche Zementleimmenge gering zu halten. Bei einem Größtkorn von 63 mm darf der Mindestzementgehalt um 30 kg/m^3 abgemindert werden. Günstig sind Kornzusammensetzungen stetiger Sieblinien nahe A oder Ausfallkörnungen zwischen den Sieblinien B und U. Um die Anreicherung von feinteilreichem Mörtel an der Betonoberfläche zu verhindern, wird der zulässige Mehlkorngehalt in Abhängigkeit von der Betonfestigkeitsklasse und vom Gehalt an Zement und anrechenbaren Zusatzstoffen begrenzt (Tafel IV.3-13).

Für Beton mit hohem Verschleißwiderstand sind alle genormten oder bauaufsichtlich zugelassenen Zementarten gleichermaßen geeignet. Zemente mit hoher Normfestigkeit liefern unter sonst gleichen Verhältnissen Betone höherer Festigkeit und sind daher günstig. Zemente mit langsamer Festigkeitsentwicklung setzen eine längere Nachbehandlung voraus, ehe der Beton dem Verschleißangriff ausgesetzt werden darf. Bei niedrigen Temperaturen, z. B. während der kalten Jahreszeit oder im Gebirge, sollten bei frühzeitiger Beanspruchung des Bauwerks Zemente mit ausreichender Erhärtungsgeschwindigkeit verwendet werden. Bei einem ausreichend nachbehandelten Beton ist der Einfluss der Zementart auf den Verschleißwiderstand im Vergleich zu anderen betontechnologischen Parametern von untergeordneter Bedeutung.

Tafel II.7.5-3: Abnutzung durch Schleifen (geprüft nach DIN 52108) verschiedener Gesteine

Gesteinsgruppen (nach DIN 52100)	Abnutzung des Natursteins durch Schleifen (ohne Bindemittel) Verlust in $cm^3/50\ cm^2$
Erstarrungssteine	
Granit, Syenit, Diorit Gabbro, Quarzporphyr	5 bis 8
Diabas	5 bis 8
Basalt, Melaphyr	5 bis 8,5
Basaltlava	12 bis 15
Schichtgesteine	
Quarzit, Grauwacke	7 bis 8
quarzitischer Sandstein	7 bis 8
sonstiger Quarzsandstein	10 bis 14
dichter (fester) Kalkstein u. Dolomit	15 bis 40
Metamorphe Gesteine	
Gneis, Granulit	4 bis 10
Amphibolit	6 bis 12
Serpentin	8 bis 18

Eine sehr wichtige Einflussgröße für den Verschleißwiderstand des Betons ist der Verschleißwiderstand des feinen und groben Zuschlags. Für einen Beton mit Verschleißbeanspruchung ist als Zuschlag bis 4 mm überwiegend Quarz oder Zuschlag mindestens gleicher Härte zu verwenden. Das grobe Korn über 4 mm muss aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand bestehen, d. h. einen geringen Schleifverlust aufweisen (**Tafel II.7.5-3**). Hierfür eignen sich so genannte Hartgesteine, z. B. Granit, Diorit, Syonit, Porphyr, Basalt, Quarzit. Demgegenüber gehören die meisten Kalksteine sowie

Tafel II.7.5-4: Schleifverschleiß und Festigkeit von Hartstoffen nach DIN 1100 in Hartstoffestrichen mit Zement nach DIN 18560 Teil 7

Hartstoffgruppe	Schleifverschleiß		Biegezugfestigkeit, Mittelwert	Druckfestigkeit, Mittelwert
	Einzelwert	Mittelwert		
	in cm^3 je 50 cm^2		N/mm^2	N/mm^2
	max.	max.	min.	min.
A (Allgemein)[1)]	5,5	5,0	10	80
M (Metall)	3,5	3,0	12	80
KS (Elektrokorund und Siliziumkarbid)	1,7	1,5	10	80

[1)] Naturstein und/oder dichte Schlacke oder Gemische davon mit Stoffen der Hartstoffgruppen M und KS

Dolomit, Sandstein, Schiefer und Tuff zu den weicheren Gesteinen. Bei besonders hoher Beanspruchung kommt die Verwendung von Hartstoffen nach DIN 1100 in Frage, wie sie bei der Herstellung von Hartstoff-Estrichen nach DIN 18560 eingesetzt werden. Unterschieden werden die Hartstoffe nach den Gruppen A, M und KS (**Tafel II.7.5-4**). Die Körner aller Zuschlagarten sollen eine mäßig raue Oberfläche und eine gedrungene Gestalt aufweisen, um die Verankerung im Zementstein zu verbessern und den Verschleißwiderstand zu erhöhen.

Betonfahrbahndecken müssen aus Gründen der Verkehrssicherheit eine ausreichende Griffigkeit aufweisen. Wichtig hierfür ist ein hoher Polierwiderstand (PSV-Wert) der verwendeten Zuschläge (s. Abschnitt II.12.3.3).

An der beanspruchten Oberfläche eines Betonbauteils kann ein hoher Verschleißwiderstand nur dann erzielt werden, wenn ein steifer, wasserarmer Beton eingesetzt wird, der bei vollständiger Verdichtung keine Anreicherungen von Feinmörtel oder gar Wasser (Bluten) an der Oberfläche aufweist. Der Nachbehandlung kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Vorteilhaft ist eine Vakuumbehandlung, da durch sie der Wasserzementwert im Bereich der Oberfläche gesenkt und der Zementstein besonders dicht und fest wird (s. Abschnitt II.10.6). Die Nachbehandlungsdauer für Beton mit hohem Verschleißwiderstand der Expositionsklassen XM2 und XM3 ist gegenüber den Festlegungen der E DIN 1045-3 zu verdoppeln.

7.6 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

7.6.1 Einstufung und Prinzip einer AKR

Alkaliempfindliche Bestandteile von Zuschlägen können mit alkalihaltigen Porenlösungen chemisch reagieren. Diese Reaktion wird übergeordnet als *Alkali-Zuschlag-Reaktion* bezeichnet. Je nach Art des angegriffenen Zuschlagbestandteils wird zwischen Alkali-Kieselsäure-, Alkali-Silicat- und Alkali-Dolomit-Reaktion unterschieden, wobei der Ablauf einer schädigenden Alkali-Silicat- und Alkali-Dolomit-Reaktion im Detail noch nicht geklärt ist. In Deutschland sind die beiden letztgenannten Reaktionen nicht aufgetreten.

Bei der *Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)* reagieren alkaliempfindliche, kieselsäurehaltige Bestandteile des Betonzuschlags mit den Alkalien der Porenlösung im Zementstein. Als Reaktionsprodukt bildet sich ein Alkalisilicat, das bestrebt ist, Wasser aufzunehmen. Die damit verbundene Volumenvergrößerung wird als Treiben bezeichnet und kann zu Rissen im Beton führen. Die Treibrisse bilden sich netzartig auf der Betonober-

fläche aus (map cracking), wenn das Bauteil nicht durch Zwang beansprucht wird. Im Rissbereich können Kieselgele austreten, die sich durch CO_2-Aufnahme aus der Luft zersetzen. Zurück bleibt weißes Alkalicarbonat, das wegen seiner hohen Löslichkeit häufig vollständig durch Niederschlagwasser gelöst und entfernt wird. Alkaliempfindliche Zuschläge unmittelbar unter der Betonoberfläche können ggf. zu Abplatzungen (pop-outs) führen [Spr8].

7.6.2 Voraussetzungen für eine schädigende AKR

Eine AKR läuft in vielen Betonen ohne eine Schädigung ab. Die Auslösung und der Ablauf einer schädigenden AKR im Beton sind von Art, Reaktivität, Menge und Korngrößenverteilung der alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteile, vom wirksamen Alkaligehalt in der Porenlösung sowie von einer ausreichenden Feuchtigkeit abhängig. Fehlt eine der drei genannten Voraussetzungen, tritt eine schädigende AKR nicht auf.

Alkaliempfindliche Zuschlagbestandteile

Die Reaktionsneigung *alkaliempfindlicher Zuschlagbestandteile* wird in erster Linie vom kristallinen Zustand der Kieselsäure (SiO_2) beeinflusst. Grobkristalliner Quarz wird nur geringfügig durch Alkalihydroxidlösungen angelöst. Diese geringe Anlösung verbessert den Verbund zwischen Zuschlag und Zementsteinmatrix. Ist der Quarz jedoch mikro- oder kryptokristallin ausgeprägt, wie z. B. in Flinten oder Kieselschiefern, oder durch gesteinsbildende Prozesse metamorph beansprucht, wie bei gestressten Quarzen in Grauwacken, kann er eine erhöhte Reaktivität aufweisen. Tridymit, Christobalit und amorphe Kieselsäure, wie z. B. im Opal oder im Opalsandstein Norddeutschlands, sowie kieselsäurehaltige Gesteinsgläser können besonders alkaliempfindlich sein [Spr8]. Duranglas verhält sich ähnlich

und wird aufgrund seiner konstanten Zusammensetzung häufig als Vergleichszuschlag für Laboruntersuchungen verwendet.

Das Ausmaß einer schädigenden AKR hängt weiterhin wesentlich von der Menge und der Korngröße der reaktionsfähigen Bestandteile im Betonzuschlag ab. Ergebnisse aus Untersuchungen mit Opal zeigen, dass die Dehnung von Prüfkörpern bei gegebenem Alkaliangebot mit steigendem Gehalt an alkaliempfindlichen Bestandteilen zunimmt, bei einem ganz bestimmten, von der Korngröße abhängigen Gehalt, der als Pessimum bezeichnet wird, ein Maximum erreicht und bei höheren Gehalten wieder abnimmt [Spr8, Loc9]. Bei Verwendung von Kies mit Opalsandstein und Flint aus Norddeutschland liegt das Pessimum für die Korngruppe 2/8 erfahrungsgemäß bei rd. 10 bis 30 M.-%. Für präkambrische Grauwacke stellt sich kein Pessimum ein. Hier ist die Schädigung umso größer, je höher der Anteil einer alkaliempfindlichen Grauwacke am Gesamtzuschlag ist.

Untersuchungen in einer 40 °C-Nebelkammer, mit denen eine beschleunigte AKR hervorgerufen wird, haben ergeben, dass die AKR bei den verschiedenen alkaliempfindlichen Zuschlägen unterschiedlich schnell abläuft (**Bild II.7.6-1**). Die Dehnung der Betone, die Kies mit Opalsandstein enthalten, nimmt wesentlich schneller zu als die der Betone mit präkambrischer Grauwacke. Betone mit Inertmaterial weisen nur die normale Temperatur- und Feuchtedehnung von rd. 0,2 bis 0,4 mm/m auf. Die Alkali-Richtlinie gibt als Grenzwert 0,6 mm/m an, oberhalb dessen die Dehnung als kritisch anzusehen ist [Ri13].

Wirksamer Alkaligehalt

Als *wirksamen Alkaligehalt* bezeichnet man den Alkaligehalt, der während der Hydration des Zements in der Porenlösung (s. Abschnitt I.4.2.3) freigesetzt wird und für eine Reaktion mit alkaliempfindlichen Bestandteilen des Zuschlags zur Verfügung steht.

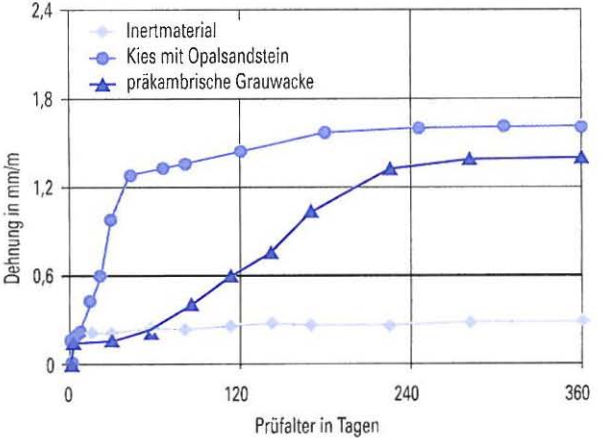


Bild II.7.6-1: Dehnungsverläufe von Betonen mit verschiedenen Zuschlägen und Portlandzement CEM I 32,5 R (1,3 M.-% als Na_2O-Äquivalent) gelagert in der 40 °C-Nebelkammer

Durch Versuche und baupraktische Erfahrungen in Deutschland hat sich bestätigt, dass auch bei Verwendung sehr reaktiver Zuschläge eine schädigende AKR dann nicht auftritt, wenn der wirksame Alkaligehalt des Zements 0,60 M.-% (Na_2O-Äquivalent, s. Gl. II.7.6-1) nicht überschreitet. Während bei Portlandzementen der gemessene *Gesamtalkaligehalt* als wirksam gilt, ist bei hüttensandhaltigen Zementen der wirksame Alkaligehalt vom Hüttensandanteil im Zement abhängig.

$$Na_2O\text{-Äquivalent} = Na_2O + 0{,}658 \cdot K_2O \text{ [M.-\%]} \quad \text{[Gl. II.7.6-1]}$$

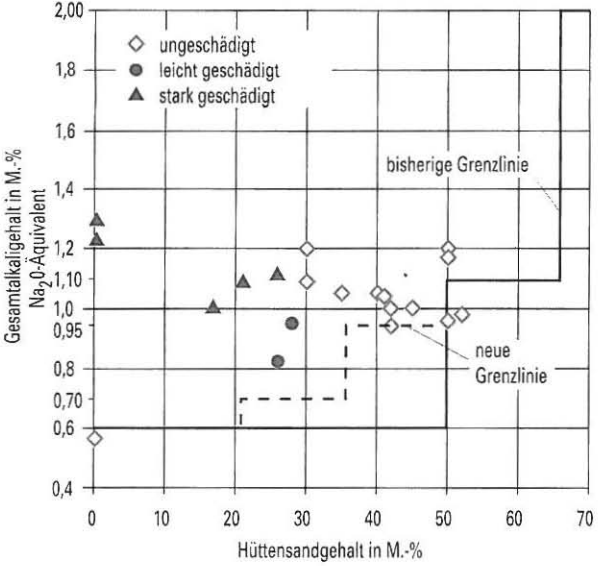


Bild II.7.6-2: Versuchsergebnisse zur Festlegung der neuen Grenzlinie für den zulässigen Gesamtalkaligehalt von Zement in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt

Umfangreiche Untersuchungen zur Erweiterung der Palette der NA-Zemente haben das Vorgehen bestätigt, den Grenzwert für den Gesamtalkaligehalt in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt festzulegen. Im **Bild II.7.6-2** sind die Versuchsergebnisse sowie die bisherigen und neuen Festlegungen des maximalen Gesamtalkaligehalts in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt für die NA-Zemente der DIN 1164 enthalten. Die neue Grenzlinie wurde so

festgelegt, dass Betone mit Zementen, die einen um 0,10 M.-% höheren Alkaligehalt aufweisen, auf jeden Fall keine Schäden bei Laborversuchen zeigen. Mit diesem Abstand von 0,10 M.-% wird u. a. der Alkalieintrag der Betonzusatzstoffe und -mittel berücksichtigt, der bei Praxisbetonen ggf. auftreten kann.

Neben dem Alkaligehalt der Ausgangsstoffe im Beton spielt auch die Menge der Ausgangsstoffe, insbesondere der Zementgehalt, eine Rolle. In der Literatur wird deshalb häufig ein Grenzwert für den wirksamen Alkaligehalt im Beton angegeben [Loc10]. Da jedoch der wirksame Alkaligehalt der verschiedenen Ausgangsstoffe z. T. nicht bekannt ist und auch die Berechnung des wirksamen Alkaligehalts für jeden Beton nicht praxisgerecht ist, werden in Deutschland Grenzen für den Gesamtalkaligehalt der Ausgangsstoffe und nicht für den Beton festgelegt. Zusätzlich muss eine etwaige Alkalizufuhr von außen durch Meerwasser oder Tausalze berücksichtigt werden.

Feuchtigkeit

Eine schädigende AKR ist maßgeblich von der Umgebungsfeuchtigkeit abhängig und entsteht nur bei ständiger oder wechselnder Durchfeuchtung eines Bauteils. Bei dauerhaft trockener Lagerung unterbleibt eine schädigende Reaktion. Feuchtigkeit infolge einer behinderten Austrocknung planmäßig trockener Bauteile (dampfdiffusionsdichte Beschichtungen, massige Bauteile) kann für eine schädigende AKR im Beton ausreichen.

Weitere Einflüsse

Über die unmittelbaren Faktoren wie Art und Menge der alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteile, wirksamer Alkaligehalt und Feuchtigkeit hinaus kann das Schädigungsausmaß einer AKR vom w/z-Wert, der Temperatur und den Bauteilabmessungen beeinflusst werden.

Die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung steigt in Beton mit Opalsandstein bei höheren w/z-Werten (> 0,50) und in Beton mit präkambrischer Grauwacke bei geringeren w/z-Werten. Ob dies verallgemeinert werden kann, wurde bisher nicht hinreichend geklärt. Weiterhin liegen auch keine ausreichenden Vergleichsuntersuchungen darüber vor, ob die für Prüfungen im Allgemeinen verwendete höhere Temperatur von 40 °C immer zu einer stärkeren Schädigung führt. Eine Abhängigkeit zwischen Bauteilabmessung und Schädigungsgrad wurde festgestellt [Sie5]. Eine eindeutige Erklärung sowie die Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse ist noch nicht vorhanden.

7.6.3 Schadensablauf

Einem äußerlich sichtbaren Schaden gehen bislang noch nicht bis ins Detail geklärte Wechselwirkungen innerhalb des Betongefüges voraus. Aufgrund eingehender Untersuchungen an An- und Dünnschliffen aus Betonen mit verschiedenen alkaliempfindlichen Zuschlägen konnte jedoch ein Schädigungsablauf dargelegt werden [Spr8], nach dem die Porosität, die Zugfestigkeit sowie die Art und der Anteil alkaliempfindlicher Zuschläge den Zeitpunkt der Rissentstehung und das Ausmaß der Rissbildung beeinflussen. Bei porösen Gesteinen ist viel Gel notwendig, um zunächst die Poren des Zuschlags zu füllen und im Weiteren einen Überdruck aufzubauen, der den Zuschlag bei Überschreiten der Zugfestigkeit zerreißt. Demgegenüber scheint bei dichten Gesteinen nur wenig Gel notwendig zu sein, um im Zuschlag einzelne Risse hervorzurufen, die sich in die Matrix hinein fortsetzen. Die schädigende AKR tritt bei dichten Zuschlägen wesentlich später auf, da die Alkali-Ionen wesentlich länger brauchen, um in den Zuschlag einzudringen.

7.6.4 Schäden in der Praxis

Sind die Bedingungen für eine schädigende AKR gegeben, so können sichtbare Risse im Beton entstehen. Diese Risse lassen sich jedoch optisch nicht einwandfrei von Rissen unterscheiden, die aufgrund anderer Schadensabläufe, z. B. aufgrund eines Frostangriffs, entstanden sind. Wird in Bauteilen eine schädigende AKR vermutet, muss grundsätzlich eine eingehende Untersuchung durch einen Sachverständigen erfolgen, um zu klären, ob eine schädigende AKR vorliegt [Sie6].

In Deutschland sind erste Schäden, an denen eine AKR maßgeblich beteiligt gewesen ist, Ende der 60er-Jahre in Schleswig-Holstein bekannt geworden. Als alkaliempfindlicher Zuschlag wurden Opalsandstein und poröser Flint nachgewiesen. Ab Mitte der 80er-Jahre wurde man vermehrt auf Schäden im Bereich der ehemaligen DDR aufmerksam. Während die Schäden nördlich einer gedachten Linie von Wittenberge über Berlin nach Frankfurt/Oder den alkaliempfindlichen Gesteinen Norddeutschlands zugeordnet werden konnten, mussten die Schäden im südlichen Bereich eingehender untersucht werden. Als alkaliempfindliche Zuschlagbestandteile wurden dabei präkambrische Grauwacke, Kieselschiefer und vereinzelt Quarzporphyre identifiziert. Hohe Zementgehalte in den Bauwerksbetonen trugen zusätzlich zu den Schäden bei. Diese Schäden, die – wenn überhaupt – wesentlich später als bei Opalsandstein und Flint auftreten, beeinträchtigen meistens nicht die Standsicherheit, können aber die Dauerhaftigkeit herabsetzen. In den Jahren 1996 bis 1998 sind erstmals Schäden an Betonfahrbahndecken in Südwestdeutschland aufgetreten, an denen eine AKR beteiligt war. Für die geschädigten Betone war Kies-Edelsplitt aus dem Bereich des Oberrheins südlich von Karlsruhe verwandt worden. Diese Kies-Edelsplitte enthalten Kieselkalke und Hornsteine, die eine gewisse Alkaliempfindlichkeit aufweisen.

7.6.5 Folgerungen für die Praxis zur Vermeidung einer schädigenden AKR

Zur Vermeidung einer schädigenden AKR im Beton wurde vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) die Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton" [Ri13] herausgegeben. Sie gilt für Zuschläge aus dem Bereich Norddeutschlands, für präkambrische Grauwacken aus dem Bereich der Lausitz sowie für weitere Gesteine, bei denen ein Verdacht auf Alkaliempfindlichkeit besteht. Zusätzlich wurde aufgrund der Schäden in Südwestdeutschland die „Vorläufige Empfehlung des DAfStb zur Vermeidung möglicher schädigender Alkalireaktionen bei Verwendung von Kies-Splitt und Kies-Edelsplitt des Oberrheins als Betonzuschlag" [Ri14] herausgegeben. Beide Regelungen gelten in Ergänzung zu DIN 4226 für Beton nach DIN 1045 bzw. E DIN 1045-2, der unter normalen Bedingungen erhärtet.

Feuchtigkeitsklassen

In Abhängigkeit von Feuchtigkeits- und Alkaliempfindlichkeitsklassen sowie vom Zementgehalt werden in der Alkali-Richtlinie betontechnologische Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden infolge einer AKR vorgegeben. Bauteile sind im Geltungsbereich der Richtlinie anhand der zu erwartenden Umwelteinflüsse den Feuchtigkeitsklassen „trocken" (WO), „feucht" (WF) oder „feucht + Alkalizufuhr von außen" (WA) zuzuordnen und im Leistungsverzeichnis durch die ausschreibende Stelle festzulegen.

Alkaliempfindlichkeitsklassen

Die Einstufung von Zuschlägen in *Alkaliempfindlichkeitsklassen* ist an verschiedene Prüfungen geknüpft. Kiese mit Opalsandstein und Flint werden mit einem Prüfverfahren beurteilt, das im

Teil 2 der Richtlinie festgelegt ist. Der massenmäßige Anteil des Opalsandsteins am Gesamtzuschlag wird durch Kochen in Natronlauge, und der des reaktionsfähigen Flints durch eine Dichtebestimmung ermittelt. Anhand der Kriterien der **Tafel II.7.6-1** wird der untersuchte Kies dann in die Empfindlichkeitsklassen EI-O bis EIII-O für Opalsandstein, und EI-OF bis EIII-OF für Opalsandstein und Flint eingestuft.

Diese Zweiteilung ist notwendig, da bei Zementgehalten ≤ 330 kg/m³ im Beton auf eine Berücksichtigung des weniger reaktiven Flints verzichtet werden kann. Setzt sich der Gesamtzuschlag aus mehreren alkaliempfindlichen Prüfkornklassen zusammen, so ist für diesen die ungünstigste Einstufung einer Prüfkornklasse anzusetzen. Dem Opalsandstein wird bei diesem Vorgehen die alkaliempfindliche Kieselkreide zugerechnet.

Präkambrische Grauwacke wird auf der Grundlage eines weltweit angewandten und in Teil 3 der Alkali-Richtlinie beschriebenen Betonversuchs in die Empfindlichkeitsklassen EI-G oder EIII-G eingestuft. Dazu werden Probekörper hergestellt und in eine 40 °C-Nebelkammer eingelagert. Als Kriterien dienen die Dehnung von drei Balken (10 cm × 10 cm × 50 cm) und die Rissbildung eines 30-cm-Würfels (s. **Tafel II.7.6-2**).

Die Grenzwerte für die Dehnung und die Rissbildung basieren auf einem Vergleich von Schäden an Bauwerken und denen im Labor [Sie5]. Eine Klasse EII-G konnte nicht festgelegt werden, da die bisher vorliegenden Forschungsergebnisse keine genauere Abstufung zulassen.

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborversuchen auf baupraktische Verhältnisse ist bisher nur bedingt gegeben. Deshalb ist eine Einstufung von Gesteinen, bei denen eine Alkaliempfindlichkeit vermutet wird, ohne dass diese Vermutung

Tafel II.7.6-1: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Zuschlag
a) mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide
b) mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint [Ri13]

a) Bestandteile	Grenzwerte in M.-% für die Alkaliempfindlichkeitsklassen EI-O	EII-O	EIII-O
Opalsandstein einschließlich Kieselkreide (über 1 mm)*)	≤0,5	≤2,0	>2,0

*) In den Prüfkornklassen 1 bis 4 mm einschließlich reaktionsfähigem Flint

b) Bestandteile	Grenzwerte in M.-% für die Alkaliempfindlichkeitsklassen EI-OF	EII-OF	EIII-OF
Opalsandstein einschließlich Kieselkreide (über 1 mm)*)	≤0,5	≤2,0	>2,0
reaktionsfähiger Flint (über 4 mm)	≤3,0	≤10,0	>10,0
5× Opalsandstein einschließlich Kieselkreide + reaktionsfähigem Flint	≤4,0	≤15,0	>15,0

*) In den Prüfkornklassen 1 bis 4 mm einschließlich reaktionsfähigem Flint

durch Schäden belegt ist, mit diesem Verfahren nur nach sehr umfangreichen Versuchen möglich.

Die Alkaliempfindlichkeitsklasse ist der Bezeichnung des Betonzuschlags nach DIN 4226 hinzuzufügen. Sie muss aus Lieferschein und Sortenverzeichnis einwandfrei hervorgehen. Die Einstufung eines Zuschlags erfolgt durch eine zugelassene Zertifizierungsstelle nach Erstprüfung. Der Übereinstimmungsnachweis besteht für Zuschläge nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie

Tafel II.7.6-2: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von präkambrischer Grauwacke [Ri13]

	Alkaliempfindlichkeitsklasse[1]	
	EI-G	EIII-G
Grenzwerte für die Dehnung der Betonbalken in mm/m[2]	$\varepsilon \leq 0{,}6$	$\varepsilon > 0{,}6$
Rissbildung der Würfel	keine	stark[3]

[1] Maßgebend ist die jeweils ungünstigere Bewertung
[2] Nach neun Monaten Nebelkammerlagerung einschließlich Wärme- und Feuchtedehnung
[3] Mit Rissbreiten $w \geq 0{,}2$ mm

(Opalsandstein und Flint) aus der werkseigenen Produktionskontrolle und der Fremdüberwachung. Für Zuschläge nach Teil 3 (präkambrische Grauwacke) ist der Übereinstimmungsnachweis nur durch einen Fremdüberwacher zu erbringen, da trotz intensiver Forschung bisher keine geeignete Prüfung des Zuschlags für eine werkseigene Produktionskontrolle entwickelt werden konnte. Wird keine Prüfung vorgenommen, ist der jeweilige Zuschlag im Geltungsbereich der Alkali-Richtlinie bzw. die präkambrische Grauwacke in deren Gewinnungsgebiet grundsätzlich in EIII einzustufen.

Vorbeugende Maßnahmen

Die im Einzelfall für den Beton zu ergreifenden vorbeugenden Maßnahmen richten sich nach dem Zementgehalt des Betons, der Alkaliempfindlichkeitsklasse des Zuschlags und der Feuchtigkeitsklasse. Sie sind für die verschiedenen Feuchtigkeitsklassen in **Tafel II.7.6-3** zusammengestellt.

Die unter Umständen einzusetzenden NA-Zemente sind in DIN 1164-1 aufgeführt (s. Abschnitt I.2.2). Der Alkalieintrag

Tafel II.7.6-3: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton

a) mit Opalsandstein und $z \leq 330$ kg/m³

b) mit Opalsandstein und Flint und $z > 330$ kg/m³

c) mit präkambrischer Grauwacke [Ri13]

a) Alkaliempfindlichkeitsklasse des Zuschlags	Erforderliche Maßnahme für die Feuchtigkeitsklasse		
	WO	WF	WA
EI-O	keine	keine	keine
EII-O	keine	keine	NA-Zement
EIII-O	keine	NA-Zement	Austausch des Zuschlags

b) Alkaliempfindlichkeitsklasse des Zuschlags	Erforderliche Maßnahme für die Feuchtigkeitsklasse		
	WO	WF	WA
EI-OF	keine	keine	keine
EII-OF	keine	NA-Zement	NA-Zement
EIII-OF	keine	NA-Zement	Austausch des Zuschlags

c) Alkaliempfindlichkeitsklasse des Zuschlags	Zementgehalt in kg/m³	Erforderliche Maßnahme für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO	WF	WA
EI-G	ohne Festlegung	keine	keine	keine
EIII-G[1)]	$z \leq 300$	keine	keine	keine
	$300 < z \leq 350$	keine	keine	NA-Zement[2)]
	$z > 350$	keine	NA-Zement[2)]	Austausch des Zuschlags

[1)] Gilt auch für nicht beurteilten Zuschlag

[2)] Oder als gleichwertig zugelassener Zement

durch Betonzusatzmittel und -stoffe wird ebenfalls in der Richtlinie beschränkt.

Die „Vorläufige Empfehlung des DAfStb zur Vermeidung möglicher schädigender Alkalireaktionen bei Verwendung von Kies-Splitt und Kies-Edelsplitt des Oberrheins als Betonzuschlag" [Ri14] wurde in Anlehnung an die Richtlinie und auf Versuchsergebnissen basierend formuliert. Unter bestimmten Voraussetzungen ist bei Verwendung von Kies-Edelsplitt des Oberrheins eine Begutachtung der Betonzusammensetzung erforderlich.

Einsatz von puzzolanischen Zusatzstoffen

Die Wirksamkeit von *puzzolanischen Zusatzstoffen* zur Vermeidung einer schädigenden AKR ist noch nicht zweifelsfrei geklärt. Es muss untersucht werden, ob die puzzolanischen Stoffe die Alkalien der Porenlösung über einen Verdünnungseffekt hinaus dauerhaft binden können, so dass sie für eine schädigende Reaktion nicht mehr zur Verfügung stehen.

8 Brandschutz

8.1 Brandschutzziele

Durch Brände in Gebäuden können Risiken für Leib und Leben von Personen sowie Schäden an ihrem Hab und Gut und an den Gebäuden entstehen. Es ist das Ziel des Brandschutzes, diesen Gefahren vorzubeugen. Ein sachgerechter *baulicher Brandschutz* ist die Grundlage für wirksame vorbeugende Maßnahmen zum Personen- und Sachschutz sowie für eine gezielte Löschtätigkeit der Feuerwehr.

Mit Beton lassen sich die grundlegenden baulichen Brandschutzmaßnahmen **(Tafel II.8.1-1)** zuverlässig und dauerhaft ausführen. Beton als mineralischer Baustoff brennt nicht bei den in einem Schadenfeuer üblicherweise auftretenden Temperaturen. Beton- und Stahlbetonbauteile erreichen einen hohen *Feuerwiderstand* [Nec2].

8.2 Hochtemperaturverhalten von Beton

Im Brandfall werden der Beton bzw. die Betonbauteile einer instationären *Temperaturbeanspruchung* ausgesetzt. Im Vollbrand können nach den ersten zehn Minuten im Brandraum bereits Temperaturen von 600 bis 800 °C erreicht sein. Nach 30 bis 40 Minuten können sie bei 1000 bis 1200 °C liegen [Kor1]. Wenngleich sich die im Beton vorhandenen Temperaturen deutlich niedriger einstellen, so vollziehen sich im Baustoff unter diesen Erwärmungsbedingungen umfangreiche stoffliche Wechselwirkungen. Bedingt durch chemisch-mineralogische und phy-

Tafel II.8.1-1: Grundsätzliche Forderungen an den baulichen Brandschutz und zugehörige bauliche Maßnahmen mit beispielsweise Betonbauteilen

Grundforderung	bauliche Brandschutzmaßnahmen
Tragfähigkeit des Bauwerks für bestimmte Zeit erhalten	Bauteile aus nicht brennbaren Baustoffen und mit einem hohen Feuerwiderstand
Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen	nicht brennbare Wände und Decken sowie nicht brennbare und lange feuerwiderstandsfähige Abschottungen im Inneren der Gebäude und zu Nachbargebäuden
Rettung der Benutzer von Bauwerken sicherstellen; Sicherheit der Rettungsmannschaften gewährleisten	Rettungswege aus nicht brennbaren Bauteilen, die einen hohen Feuerwiderstand haben und lange gefahrlos benutzt werden können
wirksame Löschtätigkeit ermöglichen	zuverlässig hoher Feuerwiderstand der Tragkonstruktion, damit ein wirkungsvolles Löschen im Inneren des Gebäudes sichergestellt ist kein brennendes Abtropfen

sikalische Vorgänge – in Abhängigkeit von der *instationären Erwärmung* – verändern sich fortlaufend die Betonstruktur und damit die technischen Eigenschaften [Kor2]. Die wesentlichsten Veränderungen beim Beton bestehen in *thermischen Dehnungen* und chemischen Umwandlungen der Zuschläge sowie im *Schwinden* des Zementsteins. Hierdurch bedingte Gefüge-

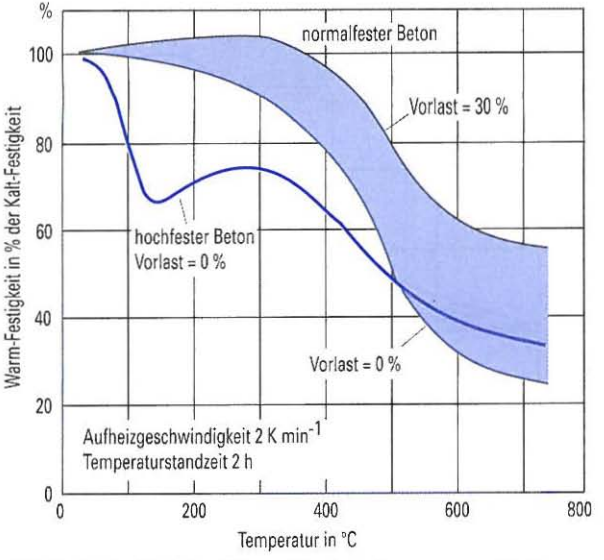


Bild II.8.2-1: Relative Warm-Festigkeit von normalfestem und hochfestem Beton mit quarzhaltigem Zuschlag – bezogen auf die Festigkeit bei Raumtemperatur

schädigungen führen zu einer Abnahme der *Festigkeit* und zu *Verformungen*. Die **Bilder II.8.2-1** und **II.8.2-2** zeigen tendenziell – in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung – den Abfall der Festigkeit sowie die thermische Dehnung bzw. Stauchung von Betonen mit quarzhaltigem Zuschlag [Sch13, Die1]. Je nach Art und Zusammensetzung reagieren die Betone unterschiedlich auf die instationäre Wärmebeanspruchung, wie sie in einem Brandfall auf die Betonbauteile einwirkt. *Kalksteinbeton*

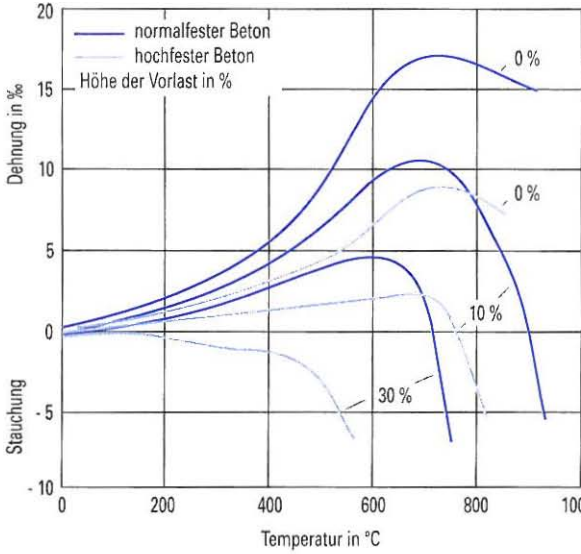


Bild II.8.2-2: Gesamtverformung von normalfestem und hochfestem Beton mit quarzhaltigem Zuschlag bei instationärer Temperaturbeanspruchung bei unterschiedlich hoher Vorlast

zeigt beispielsweise im Vergleich zum Beton mit quarzitischem Zuschlag bei > 600 °C eine um bis zu 4‰ geringere Dehnung. Dies bewirkt einen höheren Feuerwiderstand von entsprechenden Bauteilen. Bei Gebäudebränden treten infolge von Kräfteumlagerung Zwangbeanspruchungen auf, wenn die freie Verformbarkeit eingeschränkt ist. Dadurch kann sich die Gesamtverformung verringern und das Versagen später eintreten.

Meist lässt sich nach einem Brand der im Beton eingetretene Temperaturverlauf nur schätzen. Sind die Bauteiloberflächen frei von Ruß, werden die Brandraumtemperaturen über 500 °C gelegen haben, weil dann der Ruß verbrennt. Wenn im Beton Temperaturen über rd. 300 °C eingetreten sind, zeigt sich der Beton an Bruchflächen leicht rosafarben [Kor1].

Abplatzverhalten

Abplatzungen sind Betonabsprengungen infolge einer Brandbeanspruchung. Man unterscheidet drei Arten von Abplatzungen **(Tafel II.8.2-1)** [Kor1, Mey3]. Abplatzungen gelten als zerstörend, wenn sie eine Verminderung des Querschnitts und je nach Tiefe ein Freilegen der Bewehrung bewirken. Hierdurch kann ein frühzeitiges Versagen der Tragfähigkeit eintreten. In Wänden und Decken können durch Abplatzungen Löcher entstehen, sodass ein Feuerdurchgang möglich ist. Als wesentliche Einflussparameter für das Abplatzverhalten gelten Bauteildicke, Höhe der Druckspannung, Betonfeuchtegehalt und Bewehrungsanordnung. Hinsichtlich der notwendigen Maßnahmen zum Vermeiden von zerstörenden Abplatzungen, die ein Versagen verursachen, ist zwischen üblichen Betonen C 20/25 bis C 45/55, *hochfesten Betonen* und *Leichtbetonen* zu unterscheiden.

Bei Bauteilen, die aus üblichem Normalbeton hergestellt werden, reicht eine brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102 Teil 4 aus, um zerstörende Abplatzungen zu vermeiden. Dies gilt auch für Bauteile aus hochfestem Beton. Allerdings sind bei Stützen aus hochfestem Beton besondere Maßnahmen erforderlich [Nau1]. Entweder müssen dem Beton Kunststofffasern zugegeben werden, die bei >100 °C schmelzen und dadurch Kanäle zur Wasserdampfentspannung bilden, oder es ist eine oberflächennahe Schutzbewehrung anzuordnen, die zur Sicherung der Betondeckung für die statisch notwendige Bewehrung dient.

Tafel II.8.2-1: Arten, Ursachen und Wirkungen von Abplatzungen bei normalfesten Betonen

Art	Ursache	Wirkung
Zuschlag-Abplatzungen	physikalische oder chemische Veränderungen infolge hoher Temperaturen, z. B. Quarzinversion	Zerplatzen oder Zersplittern einzelner Gesteinskörner auf der Betonoberfläche in Form von Pop-outs
explosionsartige Abplatzungen	plötzliche Betonabsprengungen innerhalb der ersten 30 min. des Brands infolge Ausströmen von Wasserdampf und Temperatur-Eigen- und Zwängungsspannungen	Durch Überschreiten von Zugspannungen und durch Scherkräfte entstehen Rissflächen im Betongefüge, so dass oberflächig schlagartig Betonstücke abfallen. Diese zerstörenden Abplatzungen reichen bis tief in den Betonquerschnitt, legen die Bewehrung frei und führen zu Löchern in dünnen Bauteilen.
Abfallen von Betonschichten	Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher Dehnungen im Betonquerschnitt und zwischen Beton und Bewehrung führen zum Ablösen größerer Betonschichten nach längerer Brandbeanspruchung, z. B. nach 90 min.	Großflächiges Freilegen von Bewehrungsanteilen und Verminderung von Querschnittsflächen, besonders in Druckbereichen der Bauteile. Diese zerstörenden Abplatzungen verursachen ein relativ frühes Versagen des Bauteils.

Beim gefügedichten Leichtbeton kann nach derzeitigem Wissensstand noch nicht für alle Bauteilarten durch eine Bemessung gemäß DIN 4102 Teil 4 das Risiko der zerstörenden Abplatzungen vermieden werden [Kor1]. Für flächige Bauteile, wie Wände und Decken, reicht es aus, die Anforderungen nach die-

ser Norm zu erfüllen. Für stabförmige Bauteile, wie Balken, Stützen oder bestimmte Rippendecken, sind die jeweiligen Randbedingungen des Einzelfalls bei der Bemessung zu berücksichtigen. Deshalb ist für diese Fälle eine gutachterliche Stellungnahme nötig. Bei Leichtbetonen mit haufwerksporigem Gefüge und bei *Porenbetonen* treten aufgrund ihrer Porenstruktur keine Abplatzungen im Brandfall auf.

Im Allgemeinen können Beton- und Stahl- bzw. Spannbetonbauteile, die während eines Brands im oberflächennahen Bereich, z. B. durch Abplatzungen geschädigt wurden, instand gesetzt werden. (s. Abschnitt II.15.4.)

8.3 Klassifizierung von Baustoffen und Bauteilen sowie deren Dimensionierung

Die Leistungsfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen im Brandfall wird durch ein genormtes Klassifizierungssystem definiert. DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen" enthält alle Vorgaben für die erforderlichen Prüfungen bzw. Beurteilungen sowie die Klasseneinteilung.

Für die Betonbauweise sind im Wesentlichen die in **Tafel II.8.3-1** angegebenen Normteile der DIN 4102 von Bedeutung. Die Normteile 1 bis 3 legen fest, wie Baustoffe und bestimmte Bauteile zu prüfen sind, damit sie je nach *Brennbarkeit* den einzelnen Baustoffklassen sowie in Abhängigkeit von der erreichten Feuerwiderstandsdauer den entsprechenden Feuerwiderstandsklassen (Bauteilklassen) zugeordnet werden können. Die für die Praxis wichtige Norm ist DIN 4102 Teil 4. Darin ist katalogartig aufgelistet, welcher Baustoff- bzw. Bauteilklasse die verschiedenen genormten Baustoffe angehören.

Beton, der nach DIN 1045 hergestellt ist, zählt zu den „nichtbrennbaren" Baustoffen der Klasse A1. In diese Klasse A1

Tafel II.8.3-1: Die für den Betonbau wesentlichen Normteile von DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“

Teil	Regelungsbereich	Inhalt
1	Baustoffe	jeweils Prüfverfahren Prüfanforderungen Klasseneinteilung
2	Bauteile	
3	Brandwände und nicht tragende Außenwände	
4	klassifizierte Baustoffe	Zuordnung von Baustoffen zu den Brennbarkeitsklassen
	klassifizierte Bauteile	Vorgaben für die Ausführung von Bauteilen mit bestimmter Feuerwiderstandsdauer

gehören auch die verschiedenen Leichtbetonarten und zementgebundene Mörtel sowie Porenbeton. Erst wenn größere Mengen brennbarer Bestandteile im Beton enthalten sind, wie z. B. bei *Polystyrolbeton*, wird die Klasse A1 nicht mehr erreicht [Kor1].

Bei Betonen nach DIN 1045 verändert der Einsatz brennbarer Bewehrungs-Abstandhalter, z. B. aus Kunststoff, und die übliche Verwendung von *Betonzusatzmitteln*, die in der Regel organische Stoffe enthalten, das Brandverhalten des Baustoffs Beton insgesamt nicht [Kor1].

Die Bauteile werden entsprechend der im Normbrandversuch gemäß DIN 4102 Teil 2 erzielten Feuerwiderstandsdauer, z. B. 30, 60, 90, 120 oder 180 Minuten, in die zugehörigen Feuerwiderstandsklassen, wie F 30, F 60 F 90, F 120 oder F 180 ein-

gestuft. Die Feuerwiderstandsdauer ist die Zeit während des Brandversuchs mit einer Temperaturbeanspruchung gemäß der genormten Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK), in der die Versuchskriterien, wie beispielsweise Tragfähigkeit, Verformung, Erwärmung der nicht brandbeanspruchten Oberflächen oder Rauchdichte, eingehalten werden.

Beton- und Stahlbetonbauteile, Leichtbetonbauteile und Bauteile aus Betonmauersteinen sowie Porenbetonbauteile können im Allgemeinen so hergestellt werden, dass sie bis in die höchste Feuerwiderstandsklasse eingestuft werden können. Dabei haben sie zudem den Vorteil, dass sie ganz aus nichtbrennbaren Baustoffen der Klasse A1 bestehen. Dies kommt bei der Klassifizierung dadurch zum Ausdruck, dass zusätzlich zur Zeitangabe der Feuerwiderstandsdauer auch Angaben zur Baustoffklasse gemacht werden, aus denen das Bauteil besteht (F...-A).

Teil 4 von DIN 4102 enthält einen umfangreichen Katalog für brandschutztechnisch klassifizierte Bauteile mit den notwendigen Angaben zur Dimensionierung von Betonbauteilen mit einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse. Tragwerksplaner können für aus Beton zu fertigende Wände, Decken, Stützen, Balken und Zugglieder sowie für Sonderbauteile, wie Brandwände, die erforderlichen Dimensionierungsangaben, wie Mindestbreite, Mindestdicke und Anordnung der Bewehrung, entweder direkt aus DIN 4102-4 entnehmen oder anhand von Tabellen in Abhängigkeit von den konstruktiven Gegebenheiten ermitteln.

Erwärmungsverhalten des Querschnitts

Für die Tragfähigkeit von Stahlbeton- oder Spannbetonbauteilen im Brandfall ist die sich in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer einstellende Temperaturverteilung im Querschnitt ein wesentliches Kriterium. Entscheidend für das Erreichen der geforderten Feuerwiderstandsdauer ist es, die Durchwärmung

des Querschnitts so zu verzögern, dass die Temperatur am *Bewehrungsstahl* vor Ablauf dieser Frist die „kritische Stahltemperatur" (crit T) nicht übersteigt. crit T ist die Temperatur, bei der unter normaler Belastung der Stahl die Fließgrenze erreicht. Eine ausreichende *Betondeckung* bewirkt den notwendigen Erwärmungsschutz [Kor3]. Die jeweils erforderliche Dicke der Betondeckung ist für die verschiedenen Feuerwiderstandsklassen je nach Art des Bauteils und seiner Abmessungen, z. B. Bauteildicke, in DIN 4102 Teil 4 in umfassenden Dimensionierungstabellen angegeben. Definiert ist in der Norm die Betondeckung durch den „Achsabstand" **(Bild II.8.3-1)**. Bei mehrlagiger Bewehrung ermöglicht ein genormtes Mittelwert-Verfahren ein gezieltes Konstruieren, um eine Minimierung der Betondeckung zu erreichen. **Bild II.8.3-2** zeigt ein Beispiel für den Verlauf der Temperaturen in einem Querschnitt in Abhängigkeit von der Dauer der Brandbeanspruchung.

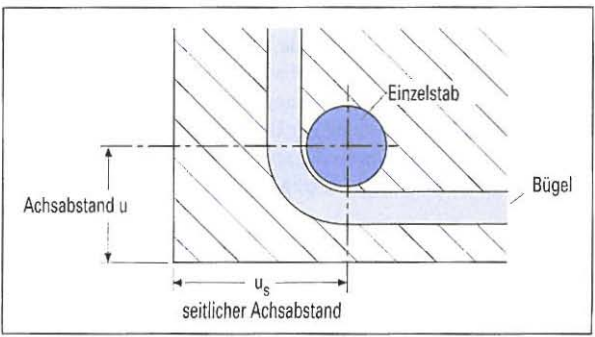


Bild II.8.3-1: Definition des Achsabstandes u sowie des seitlichen Achsabstandes u_s bei dreiseitig beflammten Balken

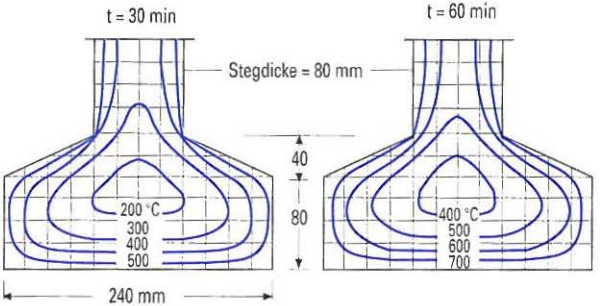


Bild II.8.3-2: Isothermen (°C) in einem Betonbauteil bei dreiseitiger Brandbeanspruchung gem. DIN 4102-2 nach 30 und 60 Minuten Prüfdauer

9 Herstellung und Verarbeitung

9.1 Herstellen des Betons

Frischbeton wird heute fast ausschließlich in Transportbetonwerken, auf Großbaustellen oder in Fertigteilwerken in mittleren und großen Mischanlagen hergestellt. Grundlegende Bedingungen für die *Herstellung* enthält E DIN 1045-2.

Für den herzustellenden Beton muss am Ort der Dosierung eine schriftliche Mischanweisung vorhanden sein, die Einzelheiten über Art und Menge der Ausgangsstoffe enthält. Die Genauigkeit beim Dosieren der Ausgangsstoffe soll für alle Betonmengen über 1 m^3 jeweils ± 3% der erforderlichen Menge betragen. Zemente, Zuschlag und pulverförmige Zusatzstoffe müssen nach Masse dosiert werden. Andere Verfahren sind zulässig, falls die geforderte Dosiergenauigkeit erreicht werden kann. Zugabewasser, Leichtzuschlag, Zusatzmittel und flüssige Zusatzstoffe dürfen nach Masse oder Volumen dosiert werden, wobei bei Einsatz von Leichtzuschlag die volumetrische Abmessung zu bevorzugen ist.

In der Regel erfolgt die *Dosierung* der Ausgangsstoffe computergesteuert. Wenn die Eigenschaften der Ausgangsstoffe nicht konstant sind, müssen während des Progammablaufs ermittelte Messwerte in Korrekturen umgesetzt werden. Eine maßgebliche Rolle spielt dabei die Oberflächenfeuchte des Zuschlags. Diese muss zur Bestimmung des Zugabewassers kontinuierlich überprüft werden. Da die Oberflächenfeuchte des Kieses gering ist, genügt meistens die Bestimmung der Sandfeuchte. Dazu werden Messgeräte benutzt, die die Feuchte durch die elektrische Leitfähigkeit, die Dielektrizitätskonstante, die elektrische Kapazität

oder die Neutronenabsorption bestimmen. Zusammen mit der Bestimmung der Feuchte des Sands können über das Messen verschiedener Frischbetoneigenschaften im Mischer, z. B. des Leistungsbedarfs am Mischerantrieb, Schwankungen in der Kornzusammensetzung und Feuchte des Zuschlags ermittelt und mittels Computersteuerung durch die Wasser- oder Sandzugabe automatisch berücksichtigt werden.

Während des Mischvorgangs muss eine vollständige Durchmischung und eine gleichmäßige Verteilung der Betonkomponenten erreicht werden.

Das *Mischen* der Ausgangsstoffe muss nach E DIN 1045-2 in einem mechanischen *Mischer* erfolgen und so lange dauern, bis die Mischung gleichförmig erscheint. Die Herstellung von Beton mittels Handmischung ist nach E DIN 1045-2 nicht mehr erlaubt. Während für Normalbeton keine Mindestmischzeiten vorgeschrieben werden, ist Leichtbeton mindestens 90 Sekunden lang zu mischen. Erfahrungsgemäß soll die Mischdauer mindestens 30 Sekunden, besser mindestens eine Minute betragen. Generell ist zu beachten, dass die Mischer nicht über ihr angegebenes Fassungsvermögen hinaus beschickt werden.

Die Maschinenmischung erfolgt chargenweise in Trommel-, Teller- oder Trogmischern oder kontinuierlich in Durchlaufmischern [Son1]. Trommelmischer sind für steife und sehr zementreiche Mischungen weniger geeignet.

Zusatzmittel sollten während des Hauptmischgangs mit dem Zugabewasser zugegeben werden. Wenn Verflüssiger oder Fließmittel nach dem Hauptmischgang zugegeben werden, muss der Beton so lange weiter gemischt werden, bis sich das Zusatzmittel vollständig in der Mischung verteilt hat und voll wirksam ist. In einem Fahrmischer muss die Mischdauer nach Zugabe eines Zusatzmittels mindestens 1 min/m^3 betragen und darf nicht kürzer als fünf Minuten sein.

Eine Sonderform des Mischens stellt das so genannte *Dampfmischen* dar. Beim Dampfmischen wird der Beton während des Mischvorgangs durch gesteuerte Zufuhr von gesättigtem Wasserdampf, der mit zum Wassergehalt des Frischbetons beiträgt, auf eine Temperatur von häufig über 30 °C erwärmt (s. Abschnitt II.11). Dadurch kann die Betonerhärtung beschleunigt werden. Die Anwendung setzt jedoch umfangreiche Erfahrungen und ausreichende Eignungsprüfungen voraus. Ein Merkblatt für die Anwendung des Betonmischens mit Dampfzuführung wurde vom VDZ [Me2] herausgegeben.

Im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den definierten Festlegungen und Anforderungen der entsprechenden Normen müssen die Ausgangsstoffe, die Ausrüstung, die Herstellung und der Beton überwacht werden. Die Produktionslenkung muss so angelegt sein, dass wesentliche Änderungen, die die Eigenschaften beeinflussen, aufgedeckt und angemessene Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Entsprechende Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle sind in E DIN 1045-2 niedergelegt.

Nach dem Ort der Herstellung des Betons wird in *Transportbeton* und *Baustellenbeton* unterschieden.

Heute wird knapp die Hälfte des gesamten deutschen Zementversands in Transportbetonwerken verwendet und etwa 80% des auf Baustellen eingebauten Ortbetons als Transportbeton geliefert. Die besondere Wirtschaftlichkeit dieses Herstellverfahrens beruht auf den mit hohem Geräteeinsatz verbundenen geringen Lohnkosten. Zudem können die Möglichkeiten der Betontechnologie in einer werkmäßigen Herstellung voll ausgenutzt werden [Wes1]. Da die Verantwortung für die Eigenschaften des Endprodukts Festbeton nicht mehr in einer Hand liegen, sondern für die Herstellung bis zur Übergabe beim Transportbetonwerk und für die Verarbeitung beim ausführenden Bauunternehmen, bedarf diese Schnittstelle einer ausreichenden

Absicherung durch Identitäts-, Abnahme- oder Kontrollprüfungen (s. Abschnitt II.17).

Neben dem Transportbeton und dem Baustellenbeton gibt es noch den so genannten *Trockenbeton*. Trockenbeton ist ein trockenes Gemisch, das aus Zement, trockenen Zuschlägen und gegebenenfalls Zusätzen werkmäßig hergestellt wird, lagerungsfähig verpackt ist und nach dem Vermischen mit einer angegebenen Wassermenge einen Beton nach E DIN 1045-2 ergibt. Trockenbeton muss der Trockenbeton-Richtlinie [Ri8] entsprechen. In Spannbetonbauteilen darf Trockenbeton zum Schließen von Aussparungen und zum Ausbessern eingesetzt werden.

9.2 Befördern des Betons

Das *Befördern* des Transportbetons zur Baustelle geschieht in Deutschland überwiegend in Mischfahrzeugen oder in Muldenkippern. Letztere sind für das Befördern von Frischbeton steifer Konsistenz, z. B. im Betonstraßenbau, zugelassen. Frischbeton anderer als steifer Konsistenz darf gemäß E DIN 1045-3 nur in Mischfahrzeugen zur Verwendungsstelle befördert werden. Unmittelbar vor dem Entladen muss der Beton nochmals gemischt werden, sodass er auf der Baustelle gleichmäßig durchmischt übergeben wird.

Es hat sich als nachteilig erwiesen, Beton in Fahrzeugen mit Ladeflächen aus Leichtmetall zu befördern, da das durch den Abrieb in den Beton gelangte Aluminium in der alkalischen Porenlösung des Frischbetons Wasserstoffgas bildet. Die Gasentwicklung führt zu unerwünschten Treiberscheinungen im Frischbeton und zu festigkeitsmindernden Poren im Festbeton.

Während des Beförderns ist der Frischbeton vor schädlichen Witterungseinflüssen zu schützen. Dies gilt besonders für Frost, aber auch für hohe Temperaturen im Sommer. Die Frischbeton-

temperaturen dürfen beim Entladen im Sommer 30 °C nicht überschreiten, sofern nicht durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind. Im Winter sollen die Betontemperaturen beim Einbringen 5 °C (bei Lufttemperaturen zwischen +5 und –3 °C) oder 10 °C (bei Lufttemperaturen unter –3 °C) nicht unterschreiten. Bei Verwendung von Zementen mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung und wenn der Zementgehalt im Beton kleiner als 240 kg/m³ ist, darf die Betontemperatur ebenfalls 10 °C nicht unterschreiten. Bei Gefahr der Frosteinwirkung auf den Frischbeton darf der Beton während der ersten Tage der Hydratation erst dann durchfrieren, wenn seine Temperatur vorher wenigstens drei Tage 10 °C nicht unterschritten hat oder wenn er bereits eine Druckfestigkeit von 5 N/mm² erreicht hat.

Mischfahrzeuge sollten spätestens 90 Minuten, Fahrzeuge ohne Rührwerk für die Beförderung von Beton steifer Konsistenz spätestens 45 Minuten nach der Wasserzugabe vollständig entladen sein.

Diese Zeiten sind noch zu kürzen, wenn beispielsweise infolge von Witterungseinflüssen mit einem beschleunigten Ansteifen des Betons gerechnet werden muss. Für Verarbeitungszeiten größer als drei Stunden gilt die DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton) [Ri3].

Um sicherzustellen, dass die vereinbarte Konsistenz bei der Übergabe des Betons tatsächlich vorhanden ist, muss bei der Betonherstellung ein Konsistenzvorhaltemaß berücksichtigt werden. Eine nachträgliche Wasserzugabe auf der Baustelle ist wegen der damit verbundenen Erhöhung des Wasserzementwerts und der Verminderung der Festigkeit und Dichtheit des erhärteten Betons nicht gestattet. Falls die Konsistenz bei *Lieferung des Betons* steifer als festgelegt und der Beton noch im Fahrmischer ist, darf die Konsistenz durch Zugabe von Fließmittel

auf den festgelegten Wert gebracht werden, sofern die Unbedenklichkeit durch die Erstprüfung nachgewiesen wurde. Die Mengen des jeweils in den Fahrmischer zugegebenen Fließmittels müssen in jedem Fall auf dem Lieferschein vermerkt werden.

Die Übergabe des Transportbetons auf der Baustelle erfolgt entweder direkt über Rutschen oder Rinnen zu den Baukörpern, in Aufnahmebehältern für die Weiterförderung (Pumpe, Kübel, Förderband usw.) oder in Zwischenbehälter.

Bei Übergabe des Betons muss der Hersteller dem Verwender einen *Lieferschein* für jede Ladung übergeben, auf dem nach E DIN 1045-2 mindestens folgende Angaben gedruckt, gestempelt oder handschriftlich eingetragen sind:

- Name des Transportbetonwerks
- Lieferscheinnummer
- Datum und Zeit des Beladens; das ist der Zeitpunkt der ersten Reaktion zwischen Zement und Wasser
- Kennzeichen des Lieferfahrzeugs
- Name des Käufers
- Bezeichnung und Ort der Baustelle
- Einzelheiten oder Verweise auf die Leistungsbeschreibung, beispielsweise Codenummer, Bestellnummer
- Menge des Betons in m^3
- Übereinstimmungserklärung mit Bezug auf die Leistungsbeschreibungen und auf E DIN 1045-2
- Name oder Zeichen der Zertifizierungsstelle, falls beteiligt
- Ankunftszeit auf der Baustelle
- Beginn der Entladung
- Ende der Entladung

Zusätzlich muss der Lieferschein folgende Einzelheiten enthalten:

a) für Beton nach Eigenschaften
- Festigkeitsklasse
- Expositionsklasse(n)
- Festigkeitsentwicklung
- Art der Verwendung (unbewehrter Beton, Stahlbeton, Spannbeton)
- Konsistenzklasse oder Zielwert der Konsistenz
- Art und Festigkeitsklasse des Zements
- Art der Zusatzmittel und Zusatzstoffe, falls welche verwendet werden
- besondere Eigenschaften (z. B. Pumpbarkeit bei Leichtbeton), falls erforderlich
- Nennwert des Größtkorns des Zuschlags
- Rohdichteklasse oder Zielwert der Rohdichte bei Leichtbeton oder Schwerbeton

b) für Beton nach Zusammensetzung
- Einzelheiten über die Zusammensetzung und, falls erforderlich, Art des Zusatzmittels
- entweder Wasserzementwert oder Konsistenz durch Angabe der Klasse oder des Zielwerts, wie festgelegt
- zusätzliche Angaben, falls erforderlich

c) für Standardbeton
- Festigkeitsklasse
- Expositionsklasse(n)
- Festigkeitsentwicklung
- Konsistenzklasse
- Art und Festigkeitsklasse des Zements
- Nennwert des Größtkorns des Zuschlags

9.3 Fördern des Betons

Das *Fördern* des Betons beginnt mit der Übergabe auf der Baustelle und endet an der jeweiligen Einbaustelle. Wesentlich ist,

dass die Leistung der *Fördergeräte* auf der Baustelle mit den angelieferten Transportbetonmengen abgestimmt ist.

Für das Fördern des Betons vom Mischer oder Transportbetonfahrzeug zur Einbaustelle bieten sich je nach der Baustellensituation, der Konsistenz des Frischbetons und der Weite des Förderwegs im Wesentlichen die nachfolgenden drei Förderarten an:

- Fördern in Gefäßen,
- Fördern in Rohrleitungen und
- Fördern auf Bändern.

Bei der Auswahl einer *Förderart* ist neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten darauf zu achten, dass sich der Frischbeton während des Förderns nicht entmischt.

Als Gefäße für das Fördern des Betons dienen beispielsweise fahrbare Behälter oder Schwebebahnen, letztere bei Großbaustellen oder in Betonwerken, ferner Kübel, die mit Kränen oder Aufzügen vom Mischer zur Einbaustelle transportiert werden. Die Förderung in Gefäßen und Kübeln zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich für alle Frischbetonkonsistenzen eignet.

Das Fördern des Frischbetons durch Rohrleitungen, insbesondere als *Pumpbeton*, hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Überwiegend werden hydraulisch angetriebene Kolbenpumpen eingesetzt. Für weichere Betonkonsistenzen sind auch Rotorschlauchpumpen gebräuchlich. Die Förderung von Spritzbeton wird in Abschnitt II.10.1 näher erläutert. Das Pumpen kann durch stationäre Anlagen oder durch bewegliche, auf Lkw montierte Pumpen erfolgen. Mit ausklappbaren Verteilermasten werden bis rund 60 m Weite oder Höhe direkt überbrückt. Es werden heute etwa 35% des Transportbetons mit Pumpen gefördert.

Generell muss beachtet werden, dass für das Fördern des Betons durch Pumpen die Verwendung von Leichtmetallrohren nicht zulässig ist (Aluminiumabrieb, Gasentwicklung (s. Abschnitt II.9.2).

Die Verbesserung der maschinellen Einrichtungen und die Weiterentwicklung der Technologie gestatten es heute, Beton über Weiten von mehr als 1000 m und Höhen von über 200 m auch ohne Staffeleinsatz, d. h. ohne das Einschalten von Zwischenstationen, zu pumpen.

Beim Verlegen der Rohrleitungen sollte beachtet werden, dass die Rohrleitungen nur unbedingt erforderliche Richtungsänderungen aufweisen; unnötige Bögen sind aufgrund des höheren Verformungswiderstands zu vermeiden. Alle Rohrkupplungen müssen bei höchstmöglichem Druck 100% wasserdicht sein, weil sonst Verstopfer unvermeidbar sind. Es ist dringend zu empfehlen, dass bei fest verlegten Rohrleitungen zunächst über die größte Entfernung gepumpt wird. Im Verlaufe des Betoniervorgangs wird dann durch Abnehmen einzelner Rohre die Leitung verkürzt.

Bei einer Hochförderung sollte die Rohrleitung senkrecht verlegt werden. Die Entfernung zwischen Betonpumpe und Steigleitung ist möglichst groß zu wählen, damit die Reibung des Betons in der waagerechten Leitung den Druck der Betonsäule aufnehmen kann. In der Praxis hat sich ein Verhältnis der Länge der Steigleitung zur unteren horizontalen Leitungslänge von etwa 2:1 als zweckmäßig herausgestellt.

In einer Abwärtsleitung darf die Betonsäule nicht abreißen. Um dies zu vermeiden, sind Widerstände in Form von Rohrkrümmern oder Schiebern einzubauen. Diese sind vor allem dann erforderlich, wenn sich an die Gefälleleitung keine längere horizontale Leitung anschließt.

Mit modernen Pumpen können bis zu rund 100 m^3 Beton pro Stunde durch eine Rohrleitung gefördert werden [Son2]. Das Pumpverfahren ist damit im Allgemeinen das leistungsfähigste Betonförderverfahren (s. **Tafel II.9.3-1**).

Tafel II.9.3-1: Leistungsvergleich verschiedener Förderarten

Förderart		Förderleistung in m^3/h
Kübel	Kran	5– 15
	Kabelbahn	50–100
Pumpe	Dichtstrom	40–100
Spritzmaschine	Dünnstrom	2– 10
Förderband		20– 60
Rutsche		10– 60

Beim Pumpen des Betons müssen Verstopfer möglichst vermieden werden. Pumpfähiger Beton darf nicht mehlkornarm sein. Er muss ein gutes Wasserrückhaltevermögen besitzen und sollte eine weiche Konsistenz aufweisen.

Die Kornzusammensetzung der Zuschläge soll im Sandbereich etwa der Sieblinie B entsprechen, d. h. an der oberen Begrenzung des günstigen Bereiches liegen. Der grobe Zuschlag muss ausreichend von Feinmörtel umgeben sein, damit der auf den Frischbeton ausgeübte Druck vom Zementleim übertragen wird und nicht nur auf das Korngerüst wirkt.

Der Beton darf auch während einer Pumppause in der Rohrleitung keinesfalls zum Absetzen von Wasser neigen und sollte über die Betonierzeit hinweg möglichst gleichmäßig zusammengesetzt sein. Besonders Schwankungen im Wassergehalt, die die Konsistenz des Betons beeinflussen, können die Bildung von Verstopfern fördern.

Im Bergbau oder in tief liegende Baugruben kann man den Beton durch Fallrohrleitungen bis in Tiefen über 1000 m unter Ausnutzung der Schwerkraft [Dah3] fördern.

Neben den genannten Förderarten in Gefäßen und Rohrleitungen haben andere Förderarten, wie z. B. auf Förderbändern, eine vergleichsweise geringe Bedeutung. Für den Transport auf geneigten Förderbändern ist nur steifer bis plastischer Beton geeignet. Bandart, -steigung und -geschwindigkeit müssen auf die Konsistenz des zu fördernden Betons abgestimmt sein. An der Abwurfstelle besteht vor allem bei steifem Beton Entmischungsgefahr. Deshalb sind dort Trichter oder Prallbleche anzuordnen.

9.4 *Einbringen* und Verdichten des Betons

Beim Betonieren, insbesondere von kompliziert geformten oder stark bewehrten Bauteilen, ist darauf zu achten, dass sich der Beton nicht entmischt. Im Allgemeinen soll er daher beim Verlassen des Fördergefäßes oder des Pumprohres nicht mehr als 1 m frei fallen. Bei größeren Höhen sind Schüttrinnen oder Schüttrohre anzuordnen.

Bauteile mit geneigter Grundfläche (Platten, Wände) sind stets vom Tiefpunkt aus zu betonieren, weil sonst der bereits verdichtete Beton abrutscht und wieder aufreißt. Beim Betonieren von Wänden ist das lagenweise Schütten und Verdichten des Betons üblich. Die Lagen bleiben jedoch oft sichtbar. Wenn man kontinuierlich, z. B. mit der Pumpe, betoniert und gleichzeitig den Beton mit Innenrüttlern verdichtet und ihn in der Böschung über kurze Strecken ohne Entmischung mit dem Rüttler treibt, kann man streifenfreien Sichtbeton erhalten.

Die Schalung ist so zu bemessen, dass die Baustelle in ihrer Betonierleistung nicht durch einen zu geringen aufnehmbaren Druck auf die Schalung behindert wird.

Der wichtigste Vorgang beim Einbau des Betons ist die vollständige Frischbetonverdichtung. Ohne eine vollständige *Verdichtung* kann der Beton nicht die im Mischungsentwurf zugrunde gelegten Festbetoneigenschaften erreichen, da bei allen betontechnologischen Regeln und Entwurfsgrundlagen eine vollständige Frischbetonverdichtung vorausgesetzt wird. Wenn die verschiedenen Verdichtungsmöglichkeiten auch sehr unterschiedlich sein können, so gilt doch allgemein die Forderung, dass die Konsistenz des Frischbetons und die gewählte *Verdichtungsart* so aufeinander abgestimmt sein müssen, dass unter den speziellen Bedingungen des Bauwerks bzw. des Produktionsvorganges eine ausreichende Verdichtung erreicht wird. Besonders sorgfältig ist die Verdichtung in den Ecken, längs der Schalung, in engen Bereichen, bei Einbauteilen, Fugenbändern und Bewehrungsanschlüssen auszuführen. So weit möglich empfiehlt sich ein *Nachverdichten* des Betons.

In Abhängigkeit von der Konsistenz des Betons werden die folgenden Verdichtungsarten angewendet:

steifer Beton:	Oberflächenrüttler, Stampfer, Schalungsrüttler zum Teil zugleich unter Anwendung von Auflasten
plastischer Beton:	Innenrüttler, Schalungsrüttler, Schocken
weicher Beton:	Innenrüttler, Schalungsrüttler, Schalungsklopfer
Fließbeton:	leichtes Rütteln, Stochern

Häufig wird das Rüttelverfahren angewendet, bei dem der Beton durch Schwingungen quasi verflüssigt wird, sodass die im Frischbeton vorhandene Luft weitgehend entweichen kann. Bei der Verdichtung von plastischem Beton durch Innenrüttler sollen die Rüttelflaschen schnell in den Beton eingeführt, aber langsam wieder herausgezogen werden. Auf diese Weise kann die Luft

nach oben entweichen, und die Rüttelgasse wird geschlossen. Die Schichtdicken des Betons und die Abstände der Eintauchstellen sind auf die Größe und Wirksamkeit des Rüttlers abzustimmen. Die Rüttler sollen mit der Bewehrung oder der Schalung möglichst nicht in Berührung kommen. Wird keine Arbeitsfuge vorgesehen, so darf beim Einbau in Lagen das Betonieren nur so lange unterbrochen werden, bis die zuletzt eingebrachte Betonschicht noch nicht erstarrt ist, sodass noch eine gute und gleichmäßige Verbindung zwischen beiden Betonschichten möglich ist. Bei Verwendung von Innenrüttlern muss die Rüttelflasche noch in die untere, bereits verdichtete Schicht eindringen.

Das Nachverdichten des Betons ist eine zusätzliche Maßnahme zur weiteren Gütesteigerung. Je nach Erstarrungszeit kann es noch nach einer Stunde und später erfolgen, solange, wie der Beton noch verformbar ist. Durch das Nachrütteln werden Hohlräume, die sich durch Nachsacken des Frischbetons, z. B. unter waagerechten Bewehrungsstäben oder Aussparungen gebildet haben, geschlossen. Insgesamt wird ein dichteres Betongefüge erreicht und das Risiko einer Rissbildung verringert. Zum Nachverdichten von senkrechten Bauteilen (Wände) eignen sich bei entsprechender Zugänglichkeit z. B. Schalungsklopfer, bei waagerechten Betonflächen kann das Nachverdichten durch Oberflächenrüttler oder durch Glättmaschinen (Propeller- oder Scheibenglätter) erfolgen. Durch diese Maßnahme lässt sich z. B. die Gefahr von Kapillar- bzw. Frühschwindrissen vermindern.

Ausführliche Hinweise über die Verdichtung des Betons durch Rüttler, insbesondere auch für erschwerte Einbaubedingungen, finden sich in DIN 4235 sowie in [Wal8].

In Betonwerken werden häufig Schalungsrüttler (Außenrüttler) angewendet, die die Schalung oder die ganze Form in Schwingungen versetzen. Dabei kann es vorkommen, dass sich die Stel-

len, an denen die Rüttler angeordnet waren, farblich an der Fertigteiloberfläche abzeichnen. Sofern dies störend ist, kann eine Abhilfe meist durch Änderung des Mischungsaufbaus, bessere Aussteifung und Dichtung der Schalung oder Änderung der Frequenz und Amplitude der Rüttler erreicht werden.

Bei erdfeuchten Betonen, wie sie für die Betonwarenherstellung typisch sind (s. Abschnitt II.11), ist die sonst übliche Abstimmung zwischen Konsistenz und Verdichtungsgerät sinngemäß auf eine Abstimmung zwischen Wassergehalt und zur Verfügung stehender Verdichtungsenergie zu übertragen. **Bild II.9.4-1** zeigt den durch Versuche ermittelten Zusammenhang zwischen der so genannten Gründruckfestigkeit (das ist die Festigkeit eines sofort nach der Verdichtung entformten, also nicht hydraulisch erhärteten Betonkörpers), dem Wassergehalt und der aufgewendeten Verdichtungsenergie. Für jede Verdichtungsenergie gibt es bei sonst gleicher Zusammensetzung des Betons einen Wassergehalt, bei dem die höchste *Gründruckfestigkeit* erreicht wird [Wie3]. Dieser Wassergehalt mit der höchsten zugeordneten Gründruckfestigkeit führt jedoch nicht automatisch zu einem optimal verdichteten Beton. Für wasserundurchlässige Betonwaren sind z. B. Wassergehalt und Verdichtungsenergie so abzustimmen [Wie1], dass die Produkte sowohl vollständig verdichtet und grünstandfest als auch im erhärteten Zustand wasserundurchlässig sind.

Auch für die Verarbeitung von Betonen mit sehr weicher Konsistenz, z. B. Fließbeton, gelten besondere Regeln. Hier ist vor allem darauf zu achten, dass Fließbeton ausreichend Mehlkorn enthält, damit er nach Zugabe des Fließmittels nicht entmischt (s. DAfStb-Richtlinie für Fließbeton [Ri4]).

Darüber hinaus kommen derzeit so genannte *„Selbstverdichtende Betone"* (s. Abschnitt II.4.6) zur Anwendung, bei denen kein Eintrag von Verdichtungsenergie notwendig ist. Derartige

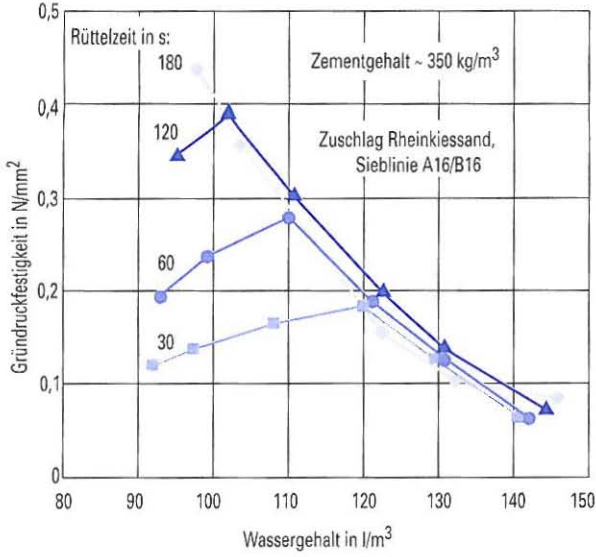


Bild 9.4-1: Gründruckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Rüttelzeit und dem Wassergehalt [Wie3]

Betone verfügen aufgrund ihrer besonderen Zusammensetzung über selbstverdichtende und selbstentlüftende Eigenschaften.

Weitere Betone, die nach besonderen Herstell- und Verdichtungsverfahren bezeichnet werden, sind z. B. Schleuder- und Vakuumbeton (s. Abschnitt II.10) und Walzbeton (Abschnitt II.12).

9.5 Entschalen des Betons

Sobald der Beton ausreichende Festigkeit aufweist, kann er entschalt werden. In besonderen Fällen kann dieses *Entschalen* sofort nach der Verdichtung erfolgen, z. B. bei grünstandfesten Betonen in der Betonwarenherstellung (s. Abschnitt II.9.4). Nur geringfügig erhärtet darf der Beton sein, wenn er eine Gleitschalung verlässt (s. Abschnitt II.10.3).

E DIN 1045-3 enthält keine Anhaltswerte für *Ausschalfristen* mehr wie die bisherige DIN 1045, da es sinnvoller ist, darüber im Einzelfall verantwortlich zu entscheiden. Gerüste und Schalungen dürfen erst dann entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit erreicht hat, um die auf das Bauteil aufgebrachten Lasten aufnehmen zu können und ungewollte Durchbiegungen aus elastischem und plastischem Verhalten des Betons sowie eine Beschädigung der Oberflächen und Kanten durch das Ausschalen zu vermeiden.

Dafür sind erforderlichenfalls Erhärtungsprüfungen durchzuführen, die den jeweils verwendeten Beton und die Temperatur am Bauwerk berücksichtigen.

9.6 Nachbehandlung und Schutz des Betons

Unter *Nachbehandlung* von Beton werden alle Maßnahmen verstanden, die den Beton bis zur ausreichenden Erhärtung gegen schädliche Einflüsse, wie z. B. sehr niedrige oder auch zu hohe Temperaturen, starkes Austrocknen sowie chemische Angriffe, schützen. Darüber hinaus ist der Beton gegen mechanische Beanspruchungen, wie beispielsweise schädliche Erschütterungen, Stöße oder Beschädigungen, zu schützen.

In der Praxis werden die Gefahren zu schnellen Austrocknens oder frühzeitigen Gefrierens häufig nicht ausreichend beachtet. Wird dem Beton das Wasser, das er für eine ausreichende Erhär-

tung benötigt, frühzeitig entzogen, so kann es vorwiegend in den oberflächennahen Schichten zu Erhärtungsstörungen kommen. Hierdurch können Festigkeitseinbußen, Absandungen, Schwindrisse und hohe Durchlässigkeiten gegenüber Wasser und Gasen auftreten. Da die Hydratation bzw. die Festigkeitsentwicklung und Zunahme der Dichtheit der Betonoberfläche aber direkt von der Dauer des ausreichenden Wasserangebots im Zementleim abhängt, wird anhand der in Bild I.5.7-3 dargestellten Abhängigkeit zwischen Hydratationsgrad und Wasserdurchlässigkeit deutlich, wie ausschlaggebend die Nachbehandlung für die Güte und Dauerhaftigkeit von Betonoberflächen ist.

Die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers aus dem frischen Beton wird vor allem durch die Temperatur (Beton und Umgebung), die relative Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft und durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Den ungefähren Zusammenhang zwischen diesen Größen zeigt **Bild II.9.6-1**. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, beträgt die verdunstete Wassermenge aus 1 m^2 Betonoberfläche 0,6 l Wasser je Stunde bei Luft- und Betontemperaturen von 20 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% und einer mittleren Windgeschwindigkeit von 20 km/h. Bei sommerlichen Temperaturen sowie bei höheren Betontemperaturen als die der Luft und größer werdenden Temperaturdifferenzen zwischen Beton und Luft erhöht sich die Wasserverdunstung. Das Bild zeigt sehr deutlich, dass die Verdunstung nicht nur durch die Temperatur, sondern noch stärker durch den Wind beeinflusst wird. Darauf ist insbesondere bei flächenhaften und exponierten Bauteilen zu achten, wie beispielsweise bei Decken und Estrichen.

Ein Beispiel verdeutlicht die Bedeutung dieser Zahlen für die Praxis: Ein Frischbeton mit 180 l Wasser je m^3 enthält je m^2 in einer 1 cm dicken Schicht 1,8 l Wasser. Die Verdunstungsrate von 0,6 l/m^2 und Stunde bedeutet rechnerisch, dass dem Beton innerhalb von drei Stunden bereits eine Wassermenge entzogen

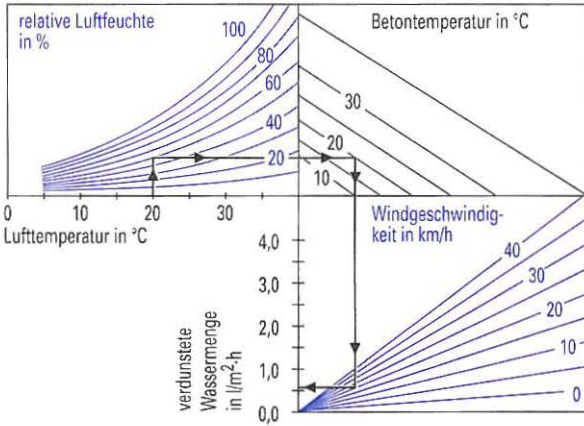


Bild II.9.6-1: Austrocknungsverhalten von Beton in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Temperatur

wird, die dem Gesamtwassergehalt einer 1 cm dicken Betonschicht entspricht. Das damit verbundene Kapillarschwinden, die Neigung zur Rissbildung und die negativen Auswirkungen auf Festigkeit, Verschleißwiderstand und Dichtigkeit der oberflächennahen Bereiche sind erheblich. Die Dauer der Nachbehandlung muss deshalb so bemessen sein, dass auch die oberflächennahen Zonen eine ausreichende Festigkeit und Dichtheit des Betongefüges erreichen, die für die Dauerhaftigkeit des Betons und den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich sind.

Die Festigkeitsentwicklung wiederum hängt eng mit der Betonzusammensetzung, der Frischbetontemperatur, den Umgebungsbedingungen und den Bauteilabmessungen zusammen, und ent-

sprechend wird auch die erforderliche Nachbehandlungsdauer davon beeinflusst.

Im Zuge der europäischen Normung werden auch einheitliche europäische Regeln für die Nachbehandlung geschaffen. Hierüber wird ausführlich in [Grü2] berichtet. Das Prinzip des europäischen Entwurfs ist in E DIN 1045-3 enthalten. Es basiert darauf, dass so lange nachbehandelt werden muss, bis im Bauteil 50% der charakteristischen Festigkeit f_{ck} erreicht ist. Vom Betonhersteller wird zur Festlegung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer eine Angabe zur Festigkeitsentwicklung des jeweiligen Betons verlangt. Die Angabe basiert auf dem Verhältnis der 2- zur 28-Tage-Druckfestigkeitsmittelwerte bei 20 °C und führt zu einer Einteilung in die Bereiche schnelle, mittlere, langsame und sehr langsame Festigkeitsentwicklung. Die Mindestdauer der Nachbehandlung, die nach E DIN 1045-3 vorgeschrieben wird, orientiert sich an diesen Bereichen der Festigkeitsentwicklung. In **Tafel II.9.6-1** ist die Mindestdauer der Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der Oberflächentemperatur zusammengestellt. Die Festigkeitsentwicklung bzw. die daraus abgeleitete erforderliche Nachbehandlungsdauer wird damit auch zu einem Merkmal der Sortenkennzeichnung von Transportbeton. Im Einzelfall erlaubt E DIN 1045-3 ausdrücklich auch den genauen Nachweis der Festigkeitsentwicklung. Eine danach bestimmte Mindestnachbehandlungsdauer führt dann zu Unterschieden im Stundenbereich, was jedoch baupraktisch wenig sinnvoll erscheint.

Die Verfahren und Methoden, die zur Nachbehandlung von Beton eingesetzt werden, müssen sicherstellen, dass ein übermäßiges Verdunsten von Wasser über die Betonfläche verhindert wird. Nach Abschluss des Verdichtens und gegebenenfalls der Oberflächenbearbeitung des Betons ist die Oberfläche sobald wie möglich nachzubehandeln.

Tafel II.9.6-1: Mindestdauer der Nachbehandlung für alle Expositionsklassen mit Ausnahme von X0 und XC1 nach E DIN 1045-2

Festigkeitsentwicklung des Betons[1]	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
$r = f_{cm2}/f_{cm28}$[2]	$r \geq 0{,}50$	$r \geq 0{,}30$	$r \geq 0{,}15$	$r < 0{,}15$
Oberflächentemperatur ϑ in °C	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen[3]			
$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5$[4]	3	6	10	15

[1] Die Festigkeitsentwicklung beschreibt das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen (nach DIN 1048-5, aus Eignungsprüfung oder Betone vergleichbarer Zusammensetzung).
[2] Lineare Interpolation zwischen den r-Werten ist zulässig.
[3] Zu verlängern um die Zeit, die die Verarbeitbarkeit um 5 Stunden überschreitet.
[4] Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Dauer um die Zeit zu verlängern, in der die Temperatur Werte unter 5 °C aufweist.

Folgende Verfahren sind sowohl alleine als auch in Kombination für die Nachbehandlung geeignet, wobei grundsätzlich zwischen wasserrückhaltenden und wasserzuführenden Maßnahmen unterschieden werden kann:

a) wasserrückhaltende Nachbehandlungsmaßnahmen
- Belassen in der Schalung
- Abdecken der Betonoberfläche mit dampfdichten Folien, die an den Kanten und Stößen gegen Durchzug gesichert sind
- Anwendung von Nachbehandlungsmitteln mit nachgewiesener Eignung als wirksamer Verdunstungsschutz

b) wasserzuführende Nachbehandlungsmaßnahmen
- Auflegen von wasserspeichernden Abdeckungen unter ständigem Feuchthalten bei gleichzeitigem Verdunstungsschutz
- kontinuierliches Besprühen mit Wasser
- Unterwasserlagerung

In **Tafel II.9.6-2** sind geeignete *Nachbehandlungsmaßnahmen* für Beton in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen zusammengestellt.

Nachbehandlungsmittel sind in der Regel nicht zulässig in Arbeitsfugen, für Oberflächen, die beschichtet werden sollen, oder für Oberflächen, an denen ein Verbund zu anderen Materialien erforderlich ist. Hier sind entweder andere Nachbehandlungsmaßnahmen zu wählen oder es ist nachzuweisen, dass keine nachteilige Auswirkung auf die nachfolgenden Arbeiten besteht, oder die Nachbehandlungsmittel sind vollständig von der Betonoberfläche zu entfernen.

Das Erhärten des Betons kann ebenfalls durch eine betontechnologisch richtige Wärmebehandlung beschleunigt werden. Auch Teile, die wärmebehandelt wurden, sollen feucht gehalten werden, da die Erhärtung im Allgemeinen am Ende der Wärmebehandlung noch nicht abgeschlossen ist und der Beton bei der Abkühlung sehr stark austrocknet. Bei der Anwendung einer Wärmebehandlung ist die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zu beachten [Ri17].

Die Richtlinie unterscheidet zwei Arten der Wärmebehandlung von Beton. Zum einen besteht die Möglichkeit, einen so genannten Warmbeton herzustellen, bei dem die Frischbetontemperatur entweder durch Vorwärmen der Ausgangsstoffe oder durch Dampfmischen [Me2] erhöht wird. Die andere Möglichkeit der Wärmebehandlung besteht in der Erwärmung des in die Schalung eingebrachten Betons (s. Abschnitt II.11.2).

Tafel II.9.6-2: Geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen für Beton in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen [Bay1]

Art	Maßnahmen	Außentemperatur in °C				
		unter −3	−3 bis +5	5 bis 10	10 bis 25	über 25
Folie/Nachbehandlungsfilm/ggf. zusätzlich Wasser	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen und benetzen; Holzschalung nässen; Stahlschalung vor Sonnenstrahlung schützen					x
	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen			x	x	
	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen und Wärmedämmung: Verwendung wärmedämmender Schalung – z. B. Holz – sinnvoll		x[1)]			
	Abdecken und Wärmedämmung: Umschließen des Arbeitsplatzes (Zelt) oder Beheizung (z. B. Heizstrahler); zusätzlich Betontemperaturen wenigstens 3 Tage lang auf +10 °C halten	x[1)]				
Wasser	durch Benetzen ohne Unterbrechung feuchthalten				x	

[1)] Nachbehandlungsdauer um Anzahl der Frosttage verlängern; Betonoberfläche mindestens 7 Tage vor Niederschlägen schützen.

10 Besondere Betone

10.1 Spritzbeton

Spritzbeton ist Beton, der mit hohem Druck in einer Schlauch- oder Rohrleitung zur Einbaustelle gefördert, dort durch eine Spritzdüse mit hoher Geschwindigkeit gegen die Auftragsfläche geschleudert und durch den Aufprall verdichtet wird. Das Verfahren eignet sich für alle geneigten Flächen einschließlich Arbeiten „über Kopf". Der nicht haftende Anteil wird „Rückprall" genannt. Gängige Anwendungsbereiche für Spritzbeton sind Stollen- und Tunnelbau, Hangsicherungen, Feuerschutzummantelung im Stahlbau und Betoninstandsetzungen, beispielsweise zur Realkalisierung [Wör1, Bot1, Lei1, Ruf1].

Grundsätzlich werden zwei *Spritzverfahren* unterschieden (**Bild II.10.1-1**). Beim *Trockenspritzverfahren* wird das Betontrockengemisch durch ventilgesteuerte Schleusenkammern der Förderleitung zugeführt und in ihr mittels Treibluft (Dünnstromförderung) zur Spritzdüse gefördert. Erst dort erfolgt die Zugabe von Wasser und gegebenenfalls eines flüssigen Zusatzmittels (Beschleuniger BE). Pulverförmige Beschleuniger können auch der Ausgangsmischung zugegeben werden. Die Konsistenz des aufgespritzten Betons entspricht in der kurzen Zeit bis zum Erstarren einem steifen Beton.

Beim *Nassspritzverfahren* wird der Frischbeton, also das fertige Betongemisch, entweder wie beim Trockenverfahren im Druckluftstrom transportiert (Dünnstromförderung) oder im Dichtstromverfahren durch Pumpen gefördert. Falls hohe Frühfestigkeiten gefordert sind, kann an der Spritzdüse ein flüssiger

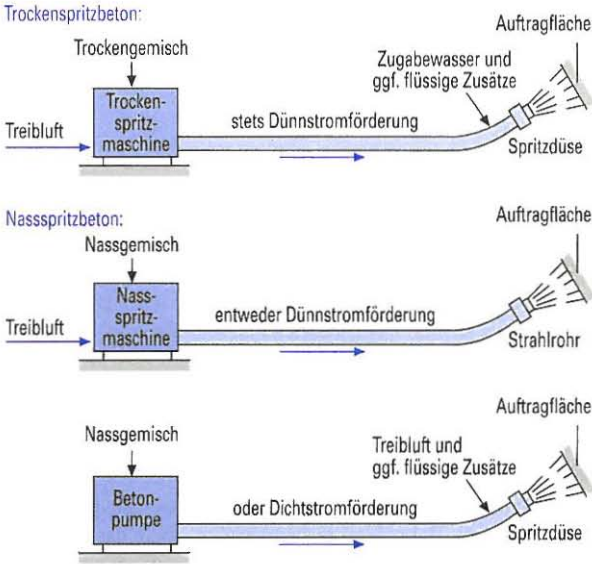


Bild II.10.1-1: Prinzipskizze für das Trocken- und Nassspritzverfahren

Beschleuniger zugegeben werden. Die Konsistenz des Betons entspricht bei der Dünnstromförderung einem steifen bis plastischen Beton und bei der Dichtstromförderung einem plastischen bis weichen Beton. Da die einmal festgelegte Frischbetonzusammensetzung an der Düse nicht mehr verändert werden kann, wird das Nassspritzverfahren bevorzugt dort angewendet, wo ein besonders gleichmäßig zusammengesetzter Spritzbeton gefordert wird.

Die Herstellung und Güteüberwachung von Spritzbeton ist in DIN 18551 geregelt. Der Beton entspricht meist der Festigkeitsklasse C 20/25. Höhere Festigkeitsklassen sind jedoch möglich. Die elastischen sowie die Schwind- und Kriechverformungen sind aufgrund des höheren Zement- und Feinsandgehalts rund doppelt so hoch wie bei üblichem Beton gleicher Festigkeitsklasse [Man5]. Die Betonqualität und die Betonierleistung hängen sehr vom Geschick bzw. dem Ausbildungsgrad des Düsenführers ab. Er beeinflusst durch die Düsenführung den Rückprall und somit auch den Materialverlust und die Betonqualität [Mai1].

Der Beton haftet durch den Schleuderdruck. Aus diesem Grund muss die Auftragfläche sauber, fest und rau sein. Beim Spritzen ist die Spritzdüse bzw. das Strahlrohr möglichst rechtwinklig zur Auftragfläche so zu führen, dass ein gleichmäßig dicker und gleichmäßig verdichteter Auftrag mit geringem Rückprall entsteht. Ein Rückprall von rund 5 M.-% stellt die untere Grenze des technisch Möglichen dar. Unter ungünstigen Bedingungen können aber auch bis zu 50 M.-% Rückprall auftreten [Wes1]. Der zweckmäßige Abstand der Spritzdüse von der Auftragfläche richtet sich nach der Austrittsgeschwindigkeit des Betons. Im Allgemeinen beträgt der Abstand zwischen 0,50 und 1,50 m.

Beim Festlegen der Betonzusammensetzung ist zu berücksichtigen, dass beim Aufspritzen insbesondere gröbere Teile des Betons zurückprallen und demzufolge der anhaftende Spritzbeton von der Ausgangsmischung in Richtung auf eine mehlkorn- und sandreichere Zusammensetzung hin abweicht. Es ist daher sicherzustellen, dass der aufgespritzte Beton die geforderten Eigenschaften aufweist. Der Zementgehalt beträgt je nach Beschleunigerzusatz zwischen 270 und 450 kg/m^3. Die Kornzusammensetzung des Zuschlags, in der Regel Sand und Kies mit einem Größtkorn von 8 bzw. 16 mm, soll zwischen den Sieblinien A und B liegen. Die gewählte Kornzusammensetzung

muss während des Spritzbetonauftrags in engen Grenzen eingehalten werden.

Da der aufgebrachte Beton sofort standfest sein muss, wird zum schnellen Ansteifen in den meisten Fällen ein Erstarrungsbeschleuniger (BE) als *Spritzbetonhilfe* eingesetzt. Die insbesondere im Tunnelbau erforderliche hohe Frühfestigkeit der Spritzbetone wurde in der Regel bisher mit alkalihaltigen Beschleunigern erreicht [Mai2, Bre2, Ruf2, Mai3].

Neben den rein spritztechnischen und bautechnischen Anforderungen werden im *Tunnelbau* Anforderungen an das Auslaugverhalten von Spritzbetonaußenschalen gestellt. Ursache hierzu sind signifikante pH-Wert-Erhöhungen im Bergwasser, das zum Abbau des Wasserdrucks bergseitig vor der Tunnelschale durch Drainagen abgeführt wird und dann z. B. dem Oberflächengewässer als Vorflut zugeführt werden muss. Hohe und zugleich lang andauernde *Alkaliauslaugungen* aus der Spritzbetonaußenschale sind im Wesentlichen die Folge des Einsatzes von Spritzbetonbeschleunigern mit hohen Alkaligehalten. Der Einsatz dieser Beschleuniger erhöht nicht nur signifikant den Alkaligehalt in der Spritzbetonaußenschale, sondern hat in der Regel auch eine hohe Kapillarporosität dieser Außenschale zur Folge, die sich zum Beispiel in Endfestigkeitseinbußen von bis zu 40% zeigt. Neben der Notwendigkeit, die Alkalifrachten zu neutralisieren, besteht die Gefahr, dass die gelösten Bestandteile in den Tunneldrainagen ausfallen und dadurch Versinterungen hervorrufen, die umfangreiche Wartungsarbeiten notwendig machen. Wenn die *Auslaugung* von Tunnelaußenschalen begrenzt werden muss, ist dazu ein ausreichend gefügedichter Spritzbeton eine unbedingte Voraussetzung.

Um die durch die Verwendung von alkalihaltigen Beschleunigern bedingten Nachteile zu vermeiden, werden verschiedene Wege beschritten. Einerseits sind von der Zementindustrie

schnell erstarrende *Spritzbetonzemente* entwickelt worden, bei deren Verwendung ein *Beschleuniger* nicht notwendig ist [Eic2]. Mit gleichem Ziel sind andererseits von der Bauchemie alkalifreie Beschleuniger entwickelt worden. Erhöhte Festigkeit und geringeres Auslaugen wurden auch durch die Zugabe von Silicastaub erreicht. Diese Maßnahmen erhöhen die Festigkeit und ermöglichen unter Umständen eine Verminderung der statisch erforderlichen Dicke der Spritzbetonaußenschale.

Das Trockenspritzverfahren wird wirtschaftlicher bei kleinen Fördermengen eingesetzt. Während Trockengemische, die zum Beispiel in Transportbetonwerken mit feuchtem Zuschlag hergestellt werden, nur bis zu rund drei Stunden verarbeitbar sind, können Trockengemische, deren gesamte Ausgangstoffe vorgetrocknet sind, über einen längeren Zeitraum vorgehalten werden. Eine Zwischenlagerung in den Umschlaggeräten ist möglich, sodass die Spritzarbeiten im Gegensatz zum Nassspritzverfahren kurzfristig unterbrochen und wieder aufgenommen werden können. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Nassspritzverfahren liegt darin, dass der Spritzschlauch mit Düse ein geringeres Gewicht aufweist und dadurch Spritzen über Kopf und bei beengten Platzverhältnissen besser möglich ist.

Das Nassspritzverfahren ist wirtschaftlich einsetzbar bei großen Fördermengen, da es eine hohe Spritzleistung aufweist. Im Vergleich zum Trockenspritzverfahren weist das Nassspritzverfahren geringere Rückprallwerte auf und aufgrund der werkmäßigen Herstellung einschließlich Wasserzugabe ist eine gleichmäßigere Qualität der Festbetoneigenschaften herstellbar.

Eine besondere Art des Spritzbetons ist der *Faserspritzbeton*, der vorwiegend mit *Stahlfasern* hergestellt wird. Für Stahlfaserspritzbeton gelten im Allgemeinen die Regeln für Spritzbeton. Üblicherweise werden Stahlfasern mit einem Durchmesser zwi-

schen 0,3 und 0,5 mm bei einer Länge zwischen 15 und 30 mm eingesetzt. Die Zugabemenge liegt bei rund 1 bis 2 Vol.-%. Stahlfaserspritzbeton wird vor allem dort angewendet, wo die Zugfestigkeit und das Arbeitsvermögen des normalen Spritzbetons nicht ausreichen oder eine geringere Dicke wirtschaftlicher ist.

10.2 Schleuderbeton

Das Schleuderverfahren dient der Herstellung von rotationssymmetrischen Hohlkörpern aus Beton. Das erste Patent für *Schleuderbeton* wurde 1907 von der Baufirma Otto & Schlosser, Meissen, angemeldet. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden die ersten Schleuderbeton-Maste hergestellt [Bac1].

Beim Schleuderbeton wird der plastische bis weiche Beton mit Wasserzementwerten zwischen 0,35 und 0,55 durch die Zentrifugalkraft eines mit 300 bis 900 U/min rotierenden Hohlkörpers nach außen gedrückt und verteilt sich in gleichmäßiger Dicke auf den Wandungen. Eine begrenzte Entmischung (Grobzuschlag außen, wasserreicher Mörtel innen) ist damit stets verbunden. Überschüssiges Wasser läuft nach innen ab, die Poren schließen sich. Dadurch kann man einen sehr niedrigen Wasserzementwert zwischen 0,25 und 0,30 erreichen. Der Schleudervorgang selbst dauert je nach Art des Produkts etwa 8 bis 15 Minuten.

Bei der Schleuderbetonherstellung wird normalerweise der Erstarrungs- und Erhärtungsvorgang durch Wärmebehandlung mittels entspanntem Nassdampf zusätzlich beschleunigt. Dadurch ist es möglich, schlaffbewehrte Produkte bereits nach drei bis vier Stunden zu entschalen.

Schleuderbeton wird zur Herstellung von hochfesten Betonhohlkörpern, z. B. Rohren, Masten, Pfählen, Pfeilern, und Stützen verwendet [Bru1, Bac1, Rud1]. Ebenfalls im Schleuderverfahren

hergestellt werden Zementmörtelauskleidungen in Stahl- und Gussrohren als dauerhafter Korrosionsschutz für Trinkwasser- und Abwasserrohre (s. DIN 2880).

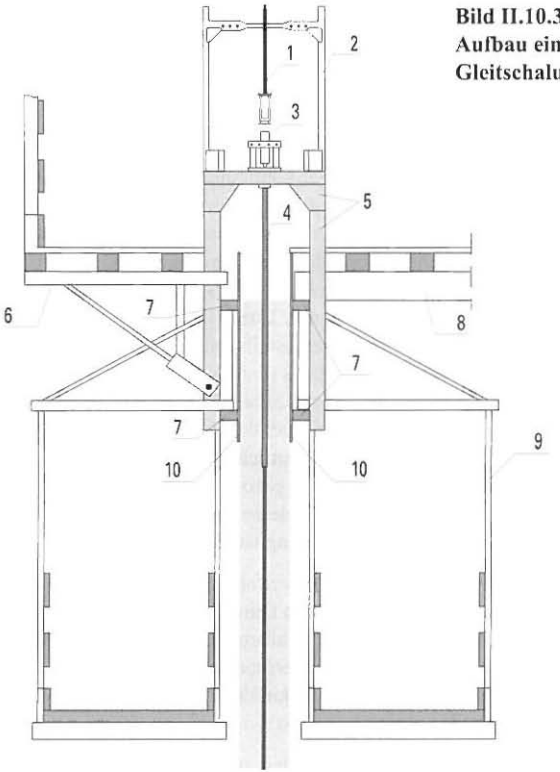
10.3 Gleitbauverfahren

Das *Gleitbauverfahren* dient der kontinuierlichen Herstellung von Betonbauteilen „am Strang" mit einer verschiebbaren Schalung. Anwendungsbereiche der Gleitbauweise sind im wesentlichen Bauwerke mit großen Höhen und wenig veränderlichen Querschnitten über die Gleithöhe, wie beispielsweise Wände, Stützen, Treppenhäuser, Silos und Türme [Dum1, Bee1, Her2, Dok1], aber auch horizontal hergestellte Bauteile, insbesondere im Bereich des Verkehrswegebaus (s. Abschnitt II.12), wie beispielsweise Betondecken, feste Fahrbahnen oder Betonschutzwände. Die Besonderheit gegenüber der Herstellung in feststehender Schalung besteht im Wesentlichen darin, dass die Schalung entlang der Betonoberfläche gezogen wird, während der Beton noch frisch im oberen (vorderen) und noch „jung" im unteren (hinteren) Teil der Schalung ist.

Die bei Anwendung des Gleitbauverfahrens geltenden Anforderungen an Bemessung, bauliche Durchbildung und Bauausführung von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton sind in E DIN 1045-1 festgelegt. Weiterführende Hinweise zum Gleitbauverfahren sind im Merkblatt des Deutschen Beton-Vereins e.V. [Me13] zusammengefasst.

Beim Gleitbauverfahren im Hochbau wird eine ca. 1,20 m hohe Schalung mit Hilfe von Hebegeräten zumeist an Kletterstangen gehoben, sodass oben in etwa 20 cm dicken Schichten Frischbeton eingefüllt werden kann und unten aus der Schalung das fertige Bauteil „austritt". Übliche Leistungen sind 5 bis 7 m pro Tag. Der Aufbau einer *Gleitschalung* ist in **Bild II.10.3-1** dargestellt.

Bild II.10.3-1:
Aufbau einer Gleitschalung



1	Kletterstange/-rohr	6	Konsolgerüst
2	Bewehrungsablage	7	Rahmenhölzer
3	Klettergerät	8	Tragholz
4	Mantelrohr	9	Hängegerüste
5	Kletterbock	10	Schalhaut

Während des Gleitens treten Reibungskräfte auf, die so klein gehalten werden müssen, dass der Beton weder in der Kontaktfläche zur Schalung noch über den Querschnitt aufreißt (**Bild II.10.3-2**). Einem „Ankleben" der Schalung an den Beton wird durch die nach unten etwas konisch erweiterte Form der Schalung und weiterhin durch sehr gleichmäßige Hubtakte vorgebeugt. Die mit Stahlblech ausgekleidete Schalung sollte dementsprechend keine „Beulen" aufweisen. Ferner muss der aus der Schalung austretende Beton ausreichend standsicher sein, um die Frischbetonlast tragen zu können.

Das Erstarren des Betons muss auf den raschen Baufortschritt abgestimmt sein. In gleichen Höhen innerhalb der Schalung

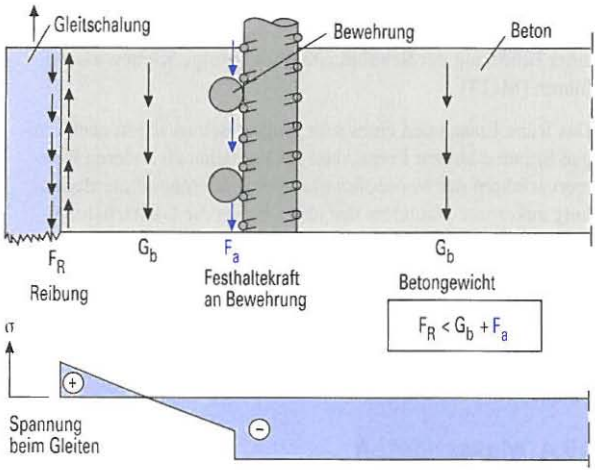


Bild II.10.3-2: Annahme über den Spannungsverlauf in einer Betonwand beim Gleitbauverfahren

muss zu gleichen Zeiten der gleiche Erstarrungszustand vorhanden sein. Der Zement muss daher nicht nur nach der Festigkeit, sondern auch nach seinem *Erstarrungsverhalten* und seinem *Wasserrückhaltevermögen* ausgewählt werden. Insbesondere müssen in Erstprüfungen die Betontemperaturen im Bauteil richtig abgeschätzt und bei der geplanten Gleitgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Dementsprechend sind Zementart, Festigkeitsklasse, Zusatzstoffe und Zusatzmittel auszuwählen. Zement- bzw. Mehlkorngehalt müssen darüber hinaus so eingestellt werden, dass genügend „Schmierstoff" zur Verfügung steht und die Schalungsreibung möglichst gering bleibt.

Die Verwendung von gebrochenem Korn führt in der Regel zu einer Erhöhung der Schalungsreibung [Dro1]. Ein höherer Mehlkornanteil kann sich vorteilhaft, ähnlich einer Schmierstoffzugabe auswirken, jedoch kann ein zu hoher Mehlkorngehalt zu einer Erhöhung der Schalungsreibung infolge Klebewirkung führen [Me13].

Das frühe Entschalen eines sehr jungen Betons schon nach einigen Stunden hat zur Folge, dass im Vergleich zu anderen Betonierverfahren der *Nachbehandlung* eine übergeordnete Bedeutung zukommt. Nachdem der junge Beton die Gleitschalung verlassen hat, wird er zunächst abgerieben. Weitere Maßnahmen sind beispielsweise das Aufsprühen von Nachbehandlungsfilmen (s. Abschnitt II.9.6) und das Einhausen durch ein Hängegerüst. Der junge Beton muss besonders sorgfältig gegen große Temperaturunterschiede im Querschnitt und gegen Witterungseinflüsse geschützt werden.

10.4 Massenbeton

Unter *Massenbeton* wird Beton für massige Bauteile, wie zum Beispiel Stützmauern, Gründungssohlen, Brückenpfeiler,

Schleusenkammerwände, Staumauern, Kernkraftwerke etc., verstanden.

Gemäß dem Merkblatt des Deutschen Beton-Vereins [Me8] spricht man von Massenbeton, wenn mindestens eine der folgenden Voraussetzungen erfüllt ist:

a) Die Wärmeentwicklung im Bauteil aufgrund der *Hydratationswärme* des Zements muss berücksichtigt werden. (s. Abschnitt II.5)
b) Die Bauteilabmessungen sind so groß, dass besondere Einbauverfahren und/oder eine besondere Baustellenlogistik notwendig sind.

Je nach Bauteilabmessung, Betonzusammensetzung, Temperaturbedingungen und Bauablauf erhöhen sich besonders im Kern des Bauteils die Temperaturen deutlich (s. Bild II.5.3-2). Durch das Abfließen der Wärme von innen nach außen stellt sich im Bauteil ein Temperaturgradient ein, der Zugspannungen an der Betonoberfläche zur Folge haben kann (s. Bild II.5.3-1).

Um diese *Zwangbeanspruchung* so gering wie möglich zu halten, gibt es verschiedene Maßnahmen zur Temperaturminderung [Me31]. Von entscheidender Bedeutung ist die Wahl und Abstimmung der richtigen Betonzusammensetzung auf die jeweiligen Gegebenheiten.

Für Massenbeton sind in der Regel Zemente mit niedriger Hydratationswärme (NW-Zemente nach DIN 1164) vorteilhaft. Üblicherweise werden bevorzugt Hochofenzemente mit hohem Hüttensandanteil verwendet. Im Interesse einer niedrigen Hydratationswärmeentwicklung sollte stets der geringst mögliche Bindemittelgehalt angestrebt werden, mit dem die an den Beton gestellten Anforderungen zuverlässig erfüllt werden. In Ausnahmefällen sind auch Abweichungen vom bestehenden Regelwerk sinnvoll. Hierzu zählen beispielsweise die Vereinba-

rung eines späteren Nachweistermins für Festbetoneigenschaften (z. B. Druckfestigkeit nach 90 Tagen). Muss zur Begrenzung der Temperaturentwicklung in Ausnahmefällen der Zementgehalt unter den in E DIN 1045-2 geforderten Grenzwert abgesenkt werden, ist eine bauaufsichtliche Zustimmung notwendig. Diese wird erteilt, wenn die im Einzelfall erforderlichen Nachweise, z. B. bezüglich des Korrosionsschutzes der Bewehrung und des ausreichenden Frostwiderstands, geführt werden können.

Da besonders bei hochbewehrten Bauteilen aus Gründen der Verarbeitbarkeit und des Korrosionsschutzes ein bestimmtes Leimvolumen notwendig ist, wird vielfach eine zusätzliche Menge an geeigneter Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 als puzzolanischer Betonzusatzstoff eingesetzt. So wurden bei größeren Bauobjekten in den letzten Jahren bevorzugt Kombinationen von CEM III/A 32,5 oder CEM III/B 32,5 mit 10 bis 20 M.-% Steinkohlenflugasche, bezogen auf den Zement- plus Zusatzstoffgehalt, verwendet [Ker1, Kot1, Koc2].

Das Größtkorn des Zuschlags beträgt in der Regel 32 mm. Es wird bei unbewehrten Massenbetonbauteilen, zum Beispiel im Talsperrenbau, auf 64 bis 125 mm erhöht. Bei sehr stark bewehrten Bauteilen kann eine Reduzierung des Zuschlaggrößtkorns auf 16 bzw. 8 mm notwendig werden.

Als Zusatzmittel werden für massige Bauteile häufig Verzögerer eingesetzt, damit ein einwandfreies Verdichten („Vernähen") der einzelnen Betonierlagen sichergestellt ist. Ebenso haben sich Fließmittel mit verzögernder Wirkung bewährt.

10.5 Unterwasserbeton

10.5.1 Anwendungsbereiche und Verfahren

Die Herstellung von *Unterwasserbeton* [Ger1, Mor2, CUR1, Gru7, Teg1] bietet sich überall dort an, wo die Trockenlegung

von Baugruben aus technischen oder wirtschaftlichen Erwägungen unvorteilhaft ist, wie z. B. beim Herstellen von Brückenpfeilern im Wasser. Auch die Herstellung von bewehrten Großbohrpfählen im Grundwasserbereich beruht allein auf der zielsicheren Herstellung von Unterwasserbeton. Für unbewehrte Bodenplatten, beispielsweise Hafensohlen, ist Unterwasserbeton erforderlich, da eine trockene Baugrube kaum herstellbar ist. Bei sehr großen und tiefen Baugruben im Grundwasser, die später trockengelegt werden sollen, hat sich unbewehrter Unterwasserbeton seit Jahrzehnten zum Ausgleich der Auftriebskräfte und zur Abdichtung bewährt. Werden dabei die Auftriebskräfte nicht durch die Eigenlast der Sohlplatte aufgehoben, so kann man die Gewölbetragwirkung dieser Platten nutzen, um die Auftriebskräfte auf geeignete Verankerungen zu übertragen [Bre3].

Wenn Unterwasserbeton für tragende Bauteile eingesetzt werden soll, muss er den Anforderungen der E DIN 1045-2 genügen. Mit Unterwasserbeton lassen sich alle Betonfestigkeitsklassen sowie Wasserundurchlässigkeit und hoher Widerstand gegen chemische Angriffe erzielen. Die Herstellung des Unterwasserbetons, die heute meist in Transportbetonwerken stattfindet, unterscheidet sich nicht von der für Beton, der über Wasser eingebracht wird. Es ist Aufgabe der Ausführungstechnik, den Mörtel oder Beton entmischungsfrei am vorgesehenen Ort einzubauen. Eine fließfähige Konsistenz der Mörtel oder Betone ist dafür im Allgemeinen erforderlich, weil eine Verdichtung zum Beispiel durch Rüttler in der Regel nicht möglich ist.

Grundsätzlich kann man zwei Verfahrenstechniken für die Herstellung von Unterwasserbeton unterscheiden [Gru7]. Bei der ersten Gruppe „Beton für Unterwasserschüttung" (s. Abschnitt II.10.5.2) wird fertig gemischter Frischbeton unter Wasser mit Hilfe von Fallrohren (Contractorverfahren), Spezialkübeln, Fallschläuchen (Hydroventilverfahren) oder Pumpleitungen einge-

bracht. Bei der zweiten Gruppe „Ausgussbeton" (s. Abschnitt II.10.5.3) wird ein vorher eingebrachtes Schottergerüst mit Zementmörtel unter Wasser injiziert (Prepakt- und Colcreteverfahren). Im Folgenden wird auf diese beiden Verfahren näher eingegangen.

10.5.2 Beton für Unterwasserschüttung

Beton für *Unterwasserschüttung* ist Beton, der unter Wasser geschüttet wird, wobei das Wasser in der Baugrube ruhig, also ohne Strömung, stehen muss. Die Wasserstände innerhalb und außerhalb der Baugrube sollen sich ausgleichen können. Die Zusammensetzung des Betons muss so beschaffen sein, dass er als zusammenhängende Masse fließt und ohne Verdichtung ein geschlossenes Gefüge aufweist. Zu bevorzugen sind Kornzusammensetzungen mit stetigen Sieblinien, die etwa in der Mitte zwischen den Sieblinien A und B liegen. Der Mehlkorngehalt muss ausreichend groß gewählt werden. Das Ausbreitmaß von Unterwasserbeton soll im Bereich zwischen 45 und 50 cm liegen. Es kann auch Fließbeton gemäß DAfStb-Richtlinie [Ri4] eingesetzt werden.

Nach E DIN 1045-2 darf der Wasserzementwert 0,60 nicht überschreiten. Bei Zuschlägen mit einem Größtkorn von 32 mm muss der Zementgehalt mindestens 350 kg/m^3 Beton betragen. Entsprechend zusammengesetzte Betone erfüllen die Anforderungen an wasserundurchlässigen Beton und sind erfahrungsgemäß gut pumpbar.

Nach E DIN 1045-2 darf Flugasche angerechnet werden. Dabei darf der Gehalt an Zement plus Flugasche 350 kg/m^3 nicht unterschreiten. Der Wasser/(Zement + 0,7 × Flugasche)-Wert darf 0,60 nicht überschreiten. Ferner muss die Höchstmenge Flugasche, die auf den Wasserzementwert angerechnet werden darf, der Bedingung Flugasche/Zement $\leq$ 0,33 genügen.

Im Folgenden werden einige Verfahren für die Herstellung von Unterwasserbeton vorgestellt:

Contractor-Verfahren

Das *Contractor-Verfahren* [CUR2, Con1, Ger2, Tod1] wird seit rund 90 Jahren angewendet. Es stellt eine der ältesten bekannten Methoden zur Einbringung von Unterwasserbeton dar. Das Prinzip ist im **Bild II.10.5-1** dargestellt.

Ein Trichter mit bis auf den Boden reichendem dichtem Schüttrohr aus Stahl wird höhenverschiebbar in die Baugrube eingestellt. Das Schüttrohr hat in der Regel einen Durchmesser zwischen 20 und 30 cm.

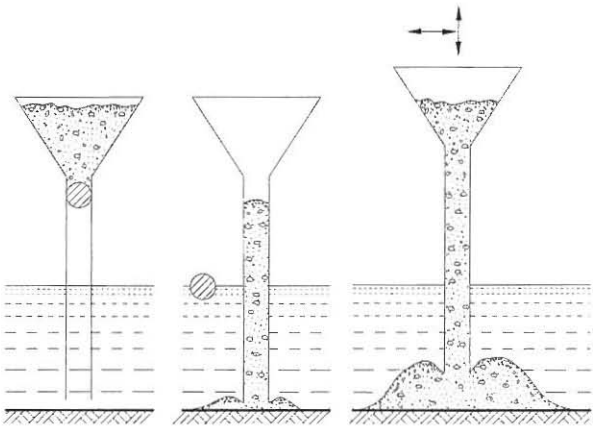


Bild II.10.5-1: Prinzipskizze für das Contractorverfahren

Nach Einsetzen eines Schaumgummiballs in das Schüttrohr wird der Trichter voll mit Beton gefüllt. Wenn der Betonvorrat im Trichter ausreicht, um das ganze Schüttrohr zu füllen, wird der Ball gelöst. Durch vorsichtiges Anheben des Schüttgeräts sinkt der Beton bis auf die Bausohle unter Verdrängung des im Rohr stehenden Wassers ab und bildet auf der Baugrubensohle je nach Trichtergröße einen mehr oder minder großen Betonkuchen. Das Rohr soll dabei möglichst bis auf die Höhe des Wasserspiegels mit Beton gefüllt bleiben. Anschließend wird der Trichter erneut mit Beton gefüllt und mit dem Schüttrohr wieder angehoben, bis Beton aus dem Rohr austritt. Das Rohr muss ständig in den eingebrachten Beton so tief eintauchen, dass der aus dem Trichter nachdringende Beton den zuvor eingebrachten von innen her seitlich und aufwärts verdrängt. Auch wenn der Trichter für das Einbringen neuen Betons etwas hochgezogen wird, muss das Schüttrohr immer ausreichend tief im Beton verbleiben. Die seitlichen Fließwege sollten möglichst kurz sein. Deshalb müssen für das Betonieren von Bauteilen mit größerer Grundfläche mehrere Trichter angeordnet werden.

Die Herstellung annähernd ebener Sohlen auch unter Verwendung mehrerer Schütteinrichtungen ist schwierig und aufwendig. Schichten mit gleichförmigem Gefüge und gleich bleibender Güte lassen sich nur bei Dicken von mindestens 1,0 bis 1,5 m erzielen. Der feste Einbau des Geräts in freier Baugrube ist aufwendig, das Gerät lässt sich nur umständlich bewegen. Die erzielbare Einbaugeschwindigkeit ist demzufolge gering.

Kübelverfahren

Das *Kübelverfahren* [CUR2, Con1] ist eine in den Niederlanden verbreitete Methode zur Einbringung von Frischbeton unter Wasser. Es bedingt die Verwendung eines Spezialkübels, in dem der einzubringende Frischbeton ohne Berührung mit dem um-

gebenden Wasser bis an die Einbaustelle gebracht werden kann. Erst dort wird der Auslauf geöffnet, und zwar so, dass der Beton stets direkt auf die Baugrubensohle oder auf den bereits vorhandenen Beton ausläuft. Öffnen und Schließen des Kübels sollten hydraulisch steuerbar sein.

Das Betonieren kann bei freier Baugrube an beliebiger Stelle begonnen oder fortgesetzt werden, ein kontinuierliches Betonieren ist jedoch nicht möglich.

Hydroventilverfahren

Das *Hydroventilverfahren* [CUR2, Hil3, Sch14] ist eine niederländische Entwicklung zur Herstellung von Unterwasserbeton. Das Gerät besteht aus einem Trichter und einem zusammendrückbaren Fallschlauch (**Bild II.10.5-2**). Der Schlauch endet in einem Stahlzylinder, der mit Ketten am Trichter höhenverstellbar angehängt ist. Dieser Auslaufzylinder dient zur Führung und Beschwerung des Schlauches. Zwischengeschaltete Stahlreifen, die mit den Ketten und dem Fallschlauch an einzelnen Punkten verbunden sind, sorgen für eine lockere, jedoch geordnete Lage des Fallschlauches. Mit ihrer Hilfe kann der Fallschlauch unterhalb des Trichters wie eine Ziehharmonika verkürzt und damit auf die gewünschte Länge gebracht werden.

Wird eine ausreichende Menge Beton in den Trichter gegeben, so gleitet sie in Form eines geschlossenen Ballens langsam im Schlauch, der durch den Wasserdruck zusammengepresst ist, hinunter. Dabei wirken auf den Beton neben der Eigenlast der äußere Wasserdruck und die Reibung zwischen Beton und Schlauchwandung. Mit dem Betonierfortschritt wird der Auslaufzylinder aufgezogen, bis die gewünschte Sollhöhe erreicht ist. Das Verfahren vermeidet mit hoher Sicherheit den freien Fall des Betons durch das Wasser. Der Beton lässt sich kontinuierlich und mengengesteuert einbringen.

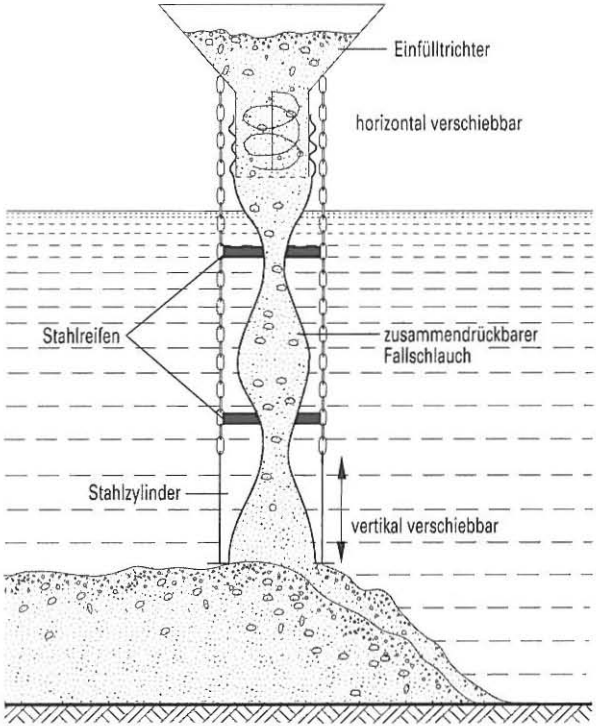


Bild II.10.5-2: Prinzipskizze für das Hydroventilverfahren

Zur Herstellung von Sohlplatten werden mehrere nebeneinander angeordnete Geräte verwendet und nach Erreichen der Sollhöhe in horizontaler Richtung verschoben. Dazu ist jedoch nicht nur

ein Verbindungsrahmen zwischen Trichter und Auslaufzylinder, sondern auch zwischen den Trichtern untereinander erforderlich.

Vervollkommnet wird das Hydroventilverfahren durch Dosierschnecken im Trichterauslauf, Höhenkontrolleinrichtungen und Abziehbohlen.

Pumpverfahren

Seit der Entwicklung leistungsfähiger Betonpumpen ist es möglich geworden, Beton in Rohrleitungen geringen Durchmessers von beispielsweise 100 mm zu fördern [CUR2, Con1, Lin1]. Damit sind die Voraussetzungen für ein ebenso einfaches wie sicheres Verfahren zur Herstellung von Unterwasserbeton gegeben.

Lässt man ein Pumprohr unter Wasser auf einer Baugrubensohle enden, so werden beim Einschalten der Pumpe zunächst das Wasser und die Luft, die sich in der Leitung befinden, hinausgedrückt, dann folgt der Beton. Die Kontaktfläche des austretenden Betons mit dem umgebenden Wasser ist so gering wie bei einem ideal funktionierenden Contractorverfahren. Im Gegensatz zum Contractorverfahren gelingt es hier jedoch ausnahmslos, den neu hinzukommenden Beton in die bereits vorhandene Betonmasse „hineinzudrücken". Dieser günstige Sachverhalt wurde von Grube [Gru7] zu einem in der Praxis verwendbaren Betonierverfahren weiterentwickelt. Die freie Beweglichkeit der Rohrleitung wurde durch einen Pumpenausleger mit herabhängendem Druckschlauch erreicht (**Bild II.10.5-3**).

Verlängert man den Schlauch am Ende durch ein Betonierrohr, dessen Länge größer ist als die Wassertiefe, so gelingt es, sowohl das leere Rohr bis auf die Baugrubensohle abzusenken als auch zu verhindern, dass das Rohr durch den Pumpendruck aus der Betonmasse herausgehoben wird.

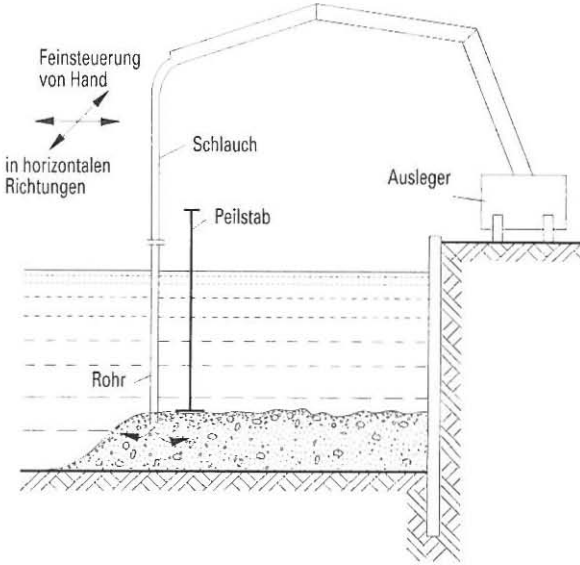


Bild II.10.5-3: Prinzipskizze für das *Pumpverfahren*

Mit einem einfachen Peilstab wird die erreichte Betonierhöhe kontrolliert. Der Peilstab gibt auch an, wie tief das Rohrende jeweils im Beton steckt. Verlangt werden mindestens 20 cm. Das Betonierrohr kann an beliebiger Stelle herausgezogen und wieder eingesetzt werden. Beim erneuten Eintauchen kann nur wenig Wasser von unten in die Rohrleitung eindringen, weil sie oben verschlossen ist.

Vervollkommnet wurde das Verfahren weiterhin durch Unterwasserabziehvorrichtungen. Mit Sonderausrüstung in Form von geführten Pontons wurden unter Wasser abgezogene, 40 cm

dicke Bodenplatten unabhängig von der Reichweite des Pumpenauslegers hergestellt.

Hydrocreteverfahren

Hydrocrete ist die Bezeichnung für ein Einbauverfahren von wasserundurchlässigem Unterwasserbeton mit Kübeln oder Pumpen. Der Beton ist dabei im frischen Zustand so erosionsfest, dass er ohne Entmischung und ohne Auswaschung von Bindemittel unter Wasser mehrere Meter frei abstürzen kann und selbst 10 cm dicke Platten sicher unter Wasser betoniert werden können. Er braucht nicht verdichtet zu werden und nivelliert sich durch Fließen auf eine Oberflächenebenheit von etwa 3 cm. Mit dem Verfahren kann unbewehrter und bewehrter Beton hergestellt werden [Küh1]. Für tragende Bauteile muss die Betonzusammensetzung E DIN 1045-2 entsprechen.

10.5.3 Unterwasser-Injektionsbeton

Der *Unterwasser-Injektionsbeton* wird im Allgemeinen auch als *Ausgussbeton* bezeichnet. Dabei wird zunächst nur der Grobzuschlag anstelle des Betons durch Schüttung eingebaut, und dann werden dessen Hohlräume durch einen besonderen Zementmörtel in aufsteigendem Strom, meist durch Verpressen mit Hilfe von Injektionsrohren ausgefüllt. Es sind Betone mit Ausfallkörnungen, bei denen nur der Mörtelanteil, d. h. nur etwa 40% des Betons den Mischer durchläuft. Im Bereich des Unterwasser-Injektionsbetons werden im Wesentlichen die beiden Verfahren *Prepact* und *Colcrete* unterschieden.

Bei der Zusammensetzung der Mörtel [AC11] für die Injektionsverfahren Prepakt und Colcrete gilt, wie für Beton für Unterwasserschüttungen, dass die Mörtel gut zusammenhängend sein müssen und sich nur schwer mit Wasser vermischen dürfen. Sie müssen außerdem so fließfähig sein, dass sie im Korngerüst

weitgehend einen geschlossen ansteigenden Flüssigkeitsspiegel bilden.

Das Vorbeiströmen des Mörtels an mit Wasser umhüllten Zuschlag fördert die Vermischung mit Wasser. Der Wasserzementwert des Mörtels muss deshalb niedriger sein als beim fertig eingebrachten Beton. Er sollte zur Herstellung wasserundurchlässiger Bauteile durch Unterwasserinjektion zwischen 0,45 und 0,55 gewählt werden.

Während man beim Prepaktverfahren Zement, Sand und Wasser sowie ein verflüssigendes und treibendes Zusatzmittel verwendet und diese Stoffe gemeinsam mischt, wird beim Colcreteverfahren meist auf Zusatzmittel verzichtet. Die Mischung der Bestandteile für den Colcretemörtel erfolgt in einem speziellen hochtourigen 2-Stufen-Mischer, wobei in der ersten Stufe Zement und Wasser gemischt (Zementleim) und in der zweiten Stufe durch Hinzufügen des Sands der Mörtel hergestellt wird. Mit diesem Verfahren lässt sich eine sehr intensive Benetzung des Zements mit Wasser erreichen, was zur Stabilität des Gemisches beiträgt.

Die für die Mörtel des Prepakt- und Colcreteverfahrens verwendeten Sande, die DIN 4226 entsprechen müssen, haben in der Regel stetige Sieblinien mit einem Größtkorn von 2 mm (Prepaktverfahren) bzw. von 2 bis 4 mm (Colcreteverfahren). Das Größtkorn des Sands muss ohne Behinderung durch die Zwickel des zu injizierenden Schottergerüsts hindurchgehen. Es darf deshalb nicht größer sein als etwa ein Zehntel des Kleinstkorns im Grobkorngerüst. Das Grobkorn, das möglichst rundkörnig sein soll, muss in Bezug auf die Gesteinseigenschaften DIN 4226 entsprechen. Die verwendeten Korndurchmesser sind in der Regel größer als 32 mm. Durch geschickte Auswahl von Kies (Schotter) und großen Steinen lässt sich der Hohlraum im Grobkorngerüst klein halten. Er beträgt in der Regel 35 bis 45 Vol.-%.

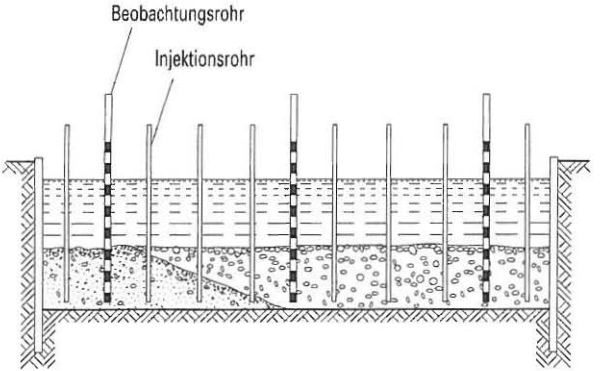


Bild II.10.5-4: Unterwasserinjektion eines Grobkorngerüsts – Prinzipskizze bei fortschreitender Injektion in einer lang gestreckten Baugrube

Das Mischungsverhältnis Zement zu Sand beträgt für Unterwasserarbeiten bei beiden Verfahren 1:1 bis 1:2 Gewichtsteile.

Unter Einbezug des Grobkorngerüstes erhält man für die Injektionsverfahren Prepakt und Colcrete im fertigen Unterwasserbeton einen Zementgehalt zwischen 280 und 350 kg/m^3.

Die Einbringverfahren Prepakt und Colcrete (**Bild II.10.5-4**) ähneln einander sehr und können daher gemeinsam beschrieben werden.

Die *Injektionsverfahren* zur Herstellung von Unterwasserbeton erfordern eine von Schlamm freie Baugrubensohle, die einerseits relativ dicht sein muss (kein grober einkörniger Kies), andererseits jedoch nicht aus bindigem Boden (Ton, Lehm) bestehen darf. Im ersten Fall würde der Injektionsmörtel unkontrolliert nach unten absinken, im zweiten Fall würde der bindige Boden

von unten in das Kies- oder Schottergerüst eindringen, das in der gewünschten Schütthöhe auf die Baugrubensohle aufgebracht wird.

Nach dem Einbau des Gesteinsgerüsts werden Injektionsrohre in regelmäßigen Abständen eingetrieben. Ihr Durchmesser beträgt bis zu 40 mm, ihr gegenseitiger Abstand je nach Gesteinsgerüst in der Regel 1,5 bis 3 m. Die Rohre sind über Wasser mit einem Schlauchsystem verbunden und können, über entsprechend angeordnete Ventile, einzeln oder in Gruppen mit dem Mörtel beschickt werden. Sie werden mit steigendem Mörtelspiegel aufgezogen, müssen jedoch stets mindestens 30 cm im Mörtel gefüllten Grobkorngerüst stecken.

Der Anstieg des Mörtelspiegels und damit auch die Eintauchtiefe der Injektionsrohre werden mit Hilfe von Beobachtungsrohren (Durchmesser 50 mm) überprüft, die wie die Injektionsrohre in regelmäßigen Abständen in das Grobkorngerüst eingetrieben wurden. Man verwendet in der Regel ein Beobachtungsrohr auf drei bis sechs Injektionsrohre.

Schlitze entlang der Mantellinien lassen den Mörtel in jeder Höhe in die Beobachtungsrohre eindringen. Der erreichte Pegelstand des Mörtels wird mit Schwimmkörpern oder elektrisch arbeitenden Messverfahren ermittelt. Die Injektionsrohre werden so beschickt, dass man entweder einen möglichst gleichmäßig ansteigenden Mörtelspiegel in der gesamten Baugrube erhält oder dass man von einem Ende der Baugrube den Mörtel in voller Einbauhöhe in natürlicher Böschung vortreibt. Diese Auswahl erfolgt entsprechend den Baugrubenabmessungen und der Leistungsfähigkeit der Misch- und Pumpanlage.

Weist der herzustellende Betonkörper auch eine Oberschalung auf, so werden an den höchsten Stellen Rohre angebracht, durch die das Wasser über dem ansteigenden Mörtel entweichen kann.

10.6 Vakuumbeton

Vakuumbeton wird besonders dort angewandt, wo es um verschleißfeste und widerstandsfähige waagerechte bis schwachgeneigte Oberflächen geht, wie beispielsweise für die Herstellung von Industriefußböden, Parkdecks, Rollschuhbahnen [Bre4, Zan1, Bru2].

Mit dem Vakuumverfahren wird dem in üblicher Weise eingebauten und zum Beispiel mit einer Rüttelbohle abgezogenen Beton nach dem Einbau ein Teil seines Wassergehalts entzogen. Dies erfolgt durch Absaugen mit einer Vakuumpumpe und einer mit einem Filtertuch versehenen Vakuumschalung oder Vakuummatte bzw. Vakuumteppich. **Bild II.10.6-1** zeigt eine schematische Darstellung der Vakuumbehandlung. Das Verfahren ermöglicht das frühe Ausschalen der Bauteile, vermindert das Schwinden und verbessert die Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit und Witterungsbeständigkeit des Betons an den Bauteiloberflächen [Fre1, Ger3, Zan2].

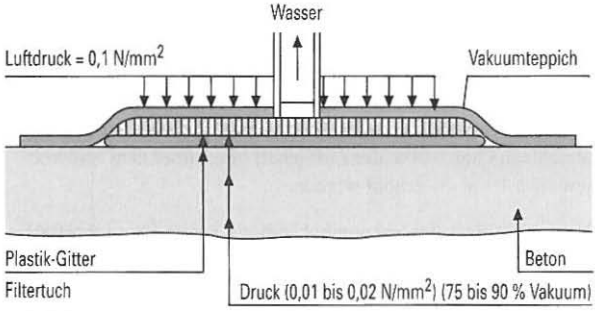


Bild II.10.6-1: Schematische Darstellung der Herstellung von Vakuumbeton

In der Regel sollte ein plastischer bis weicher Beton mit einem Ausbreitmaß von 42 ± 3 cm eingesetzt werden. Die Sieblinie des Zuschlags sollte im günstigen Bereich möglichst nahe der Sieblinie A liegen. Um den Entzug des Wassers zu erleichtern, sollte der Mehlkorngehalt des Betons auf den kleinstmöglichen Wert begrenzt werden. Dadurch soll eine möglichst große Tiefenwirkung der Vakuumbehandlung erreicht und die notwendige Dauer gering gehalten werden. Der Einsatz von mehlfeinen Betonzusatzstoffen kann die notwendige Dauer der Vakuumbehandlung verlängern. Mit der Vakuumbehandlung sollte sofort nach dem Abziehen mit der Rüttelbohle begonnen werden. Die Behandlungsdauer beträgt ein bis zwei Minuten je Zentimeter Deckendicke. Die Tiefenwirkung ist auf 10 bis 20 cm begrenzt.

Durch das Absaugen wird der Wasserzementwert vermindert. Es entsteht eine dichtere, wasserärmere Packung der festen Betonbestandteile, die zu einer hohen Grünstandfestigkeit des Betons führt [Wes1]. Die Bauteile verlieren dabei auf 20 cm rund 1 cm an Höhe. Dickere Bauteile können die Grünstandfestigkeit beim Betreten wieder verlieren, wenn Wasser kapillar nachgesaugt werden kann. Betone, die planmäßig, auch über größere Dicke, einen Wasserzementwert $\leq 0{,}50$ und einen hohen Mehlkorngehalt aufweisen, lassen sich oft nur schwer vakuumieren. Da durch die Vakuumbehandlung der Gehalt an Mikroluftporen, die in Luftporenbeton durch LP-Mittel eingeführt werden, etwas abnehmen kann, sollte der Luftgehalt gegenüber dem Sollwert um etwa 1 Vol.-% erhöht werden.

Nach Abschluss der Vakuumbehandlung ist die Betonoberfläche maschinell abzuscheiben.

Damit das im Beton nach der Vakuumbehandlung verbliebene Wasser für die Hydratation des Zements nicht verdunstet, sollte eine sofortige Nachbehandlung erfolgen. Ansonsten gelten die

allgemeinen Regeln für die Nachbehandlung und den Schutz des Vakuumbetons.

10.7 Sichtbeton

Unter *„Sichtbeton"* werden im Allgemeinen Betonflächen verstanden, die für den Betrachter als Oberfläche sichtbar bleiben und an die hinsichtlich des Aussehens besondere Anforderungen gestellt werden. Es bestehen keine spezifischen Vorschriften zur Planung, zur Betonzusammensetzung, zur Bauausführung oder zur Beurteilung von Sichtbetonflächen.

Im Wesentlichen unterscheidet man bei der Herstellung von Sichtbetonflächen zwischen den Oberflächen, bei denen die Schalhaut als Gestaltungselement benutzt wird, und Betonflächen, die nachträglich bearbeitet werden. In beiden Fällen kann die Farbe als weiteres gestalterisches Merkmal eingesetzt werden, z. B. durch die Verwendung von Zement mit besonderer Farbwirkung, durch den Einsatz von *Pigmenten* und die Wahl besonderer Zuschläge. Signifikante Beispiele für Zemente, die aufgrund spezieller Herstellmethoden eine besondere Eigenfarbe aufweisen, sind Weißzemente, die im Wesentlichen ihre weiße Farbe durch die Verwendung von eisenoxidfreiem Klinker erhalten, und Portlandölschieferzement mit rot-brauner Eigenfarbe, der unter dem Handelsnamen Terrament vertrieben wird. In DIN 18217 „Betonflächen und Schalungshaut" werden die Zusammenhänge von *Betonoberfläche*, *Schalung* und Bearbeitung erläutert und begrifflich definiert. DIN 18500 *„Betonwerkstein"* enthält die verschiedenen Bearbeitungsarten, wie beispielsweise Waschen, Spitzen, Scharrieren, Sandstrahlen, Schleifen, mit denen Betonoberflächen besonders gestaltet werden können.

Da die Ausführung von Sichtbeton nicht nach definierten technischen und vertraglichen Regeln erfolgen kann und ästhetische

Gesichtspunkte bei der Beurteilung zu berücksichtigen sind, kann es in der Baupraxis leicht zu unterschiedlichen Auffassungen zwischen den Vertragspartnern über das Aussehen und die Akzeptanz von Sichtbetonflächen kommen. Solche Schwierigkeiten lassen sich weitgehend vermeiden, wenn die Bauleistung auf der Basis von Musterflächen vereinbart und die Merkblätter „Sichtbeton" [Me18] und „Sichtbetonflächen von Fertigteilen" [Me94] beachtet werden. Darin sind konkrete Empfehlungen zu Planung und Ausschreibung, Herstellung und Beurteilung von Sichtbetonflächen zusammengefasst. Darüber hinaus geben die Hinweise in den Veröffentlichungen [Frü1, Sch15, Ebe1] der Praxis Hilfestellung zu der Ausführung von Sichtbeton.

11 Fertigteile

11.1 Produktgruppen und Betonarten

Die *werkmäßige Herstellung* von *Betonerzeugnissen* ist so alt wie die Betonanwendung. In stationären Betonwerken werden heutzutage eine Vielzahl von verschiedenen Betonwaren, wie z. B. Betonpflastersteine, Betonmauersteine, Betonrohre, und von großformatigen Betonfertigteilen, wie z. B. Wände, Decken, Stützen, aber auch ganze Gebäudeeinheiten, wie z. B. Garagen, Raumzellen, hergestellt [Ste1, BGB1]. Da die stationären Herstellverfahren für die verschiedenen Produktarten sehr unterschiedlich sind, unterscheiden sich auch die jeweils verwendeten Betonarten. In der **Tafel II.11.1-1** sind für die wesentlichen Produktgruppen, die in den Betonwerken hergestellt werden, die üblicherweise verwendeten Betonarten angegeben.

Die Auswahl der jeweiligen Betonart ergibt sich aus der Erfüllung der Produkteigenschaften und aus den Bedingungen einer technisch und wirtschaftlich optimalen Produktionsmethode. Üblicherweise erfolgt bei jedem industriellen Fertigungsprozess eine Optimierung der Einzelschritte. Daraus folgt die Festlegung der Betonart bzw. die Wahl der Frisch- und Festbetoneigenschaften. Die große Variationsbreite, die die moderne Betontechnologie bietet, ermöglicht optimal auf die Herstelltechnik abgestimmte Betonrezepturen.

Es gehört zu den Grundanforderungen an die Betontechnologie bei der werkmäßigen Herstellung von Betonwaren oder Betonfertigteilen, dass die Erzeugnisse nach der Formgebung so früh wie möglich die nötige Festigkeit erreichen, damit sie aus der

Tafel II.11.1-1: Wesentliche Produktgruppen der in Betonwerken hergestellten Betonfertigteile und Betonwaren mit Hinweisen zu den dafür im Allgemeinen verwendeten Betonarten

Produktgruppe	Produktnorm
tragende/großformatige Betonfertigteile	
– Wand-, Decken-, Dach- und Skelettbauteile	E DIN 1045-2
– Raumzellen, z. B. Garagen	
– massive Wände mit hoher Wärmedämmung	DIN 4232 (prEN 1520) Zulassung
Mauersteine aus Beton	
– Hüttensteine	DIN 398
– Hohlblöcke	DIN 18151
– Vollstein, Vollblöcke	DIN 18152
– Steine aus Normalbeton	DIN 18153
– Porenbeton-Blocksteine/-Plansteine	DIN 4165
Straßenbauerzeugnisse aus Beton	
– Pflastersteine	DIN 18501 (prEN 1338
– Platten	DIN 485 (prEN 1339
– Bordsteine	DIN 483 (prEN 1340
Rohre und Schächte aus Beton	
– unbewehrte Betonrohre	DIN 4032
– Schächte	DIN 4034
– Stahlbetonrohre	DIN 4035
Betonmaste	DIN 4228 (E DIN EN 12843)

Erhärtung		übliche Betonarten
in Form	sofort entformt	
X		– jeweils
X		Normalbeton und
X		gefügedichter Leichtbeton
X		– haufwerksporiger Leichtbeton
X		– Porenbeton
(im Autoklaven)		
	X	– gefügedichter Beton
	X	– haufwerksporiger Leichtbeton
	X	– haufwerksporiger Leichtbeton
	X	– Normalbeton
X		– Porenbeton
(im Autoklaven)		
	X	erdfeuchter Beton, gefügedicht mit möglichst hoher Grünstandfestigkeit
	X	überwiegend in zweischichtiger
	X	Ausführung
	X	möglichst dichter Normalbeton
	X	erdfeucht mit hoher Grünstandfestigkeit oder
X		plastischer Konsistenz
		Einsatz je nach Herstellverfahren
X		Normalbeton, verarbeitet im Schleuderbeton-Verfahren

Form herausgehoben oder gedrückt werden können und dass sie außerhalb des Produktionsbereichs bis zum Transport zur Einbaustelle lagern können [Dah4, Wie3]. Daraus resultieren zwei grundlegende Produktionsweisen:

1. Beton mit plastischer Konsistenz wird in Formen gefüllt, durch Außenrüttler verdichtet und erhärtet dort, bis das entstandene Bauteil aus der Form gehoben und zur weiteren Erhärtung gelagert werden kann.
   Um eine hohe *Frühfestigkeit* zu erreichen, werden im Allgemeinen Betone mit einem, im Vergleich zu Ortbetonen relativ geringem Wasserzementwert und mit möglichst schnell erhärtenden Zementen eingesetzt. Zur weiteren Frühfestigkeitssteigerung kann eine Wärmebehandlung (s. Abschnitt II.11.2) zur Erhärtungsbeschleunigung angewendet werden.

2. Ein *erdfeuchter Beton* wird in eine Form gefüllt und unter hoher Intensität (Rüttel-Press-Verdichtung) so verdichtet, dass aufgrund der so genannten *Grünstandfestigkeit* ein sofortiges Entformen möglich ist und sich das frische Produkt praktisch nicht verformt [Wie1]. In diesem Zustand erhärtet das Produkt.
   Ein erdfeucht zu verarbeitender Beton hat einen geringen Wasserzementwert, der in der Regel bei 0,36 bis 0,38 liegt. Dieser resultiert aus dem für das Erreichen der Grünstandfestigkeit erforderlichen niedrigen Wassergehalt der Mischung.
   Die erzielbare Grünstandfestigkeit hängt im Wesentlichen von der Menge des Mehlkorns und dem Wassergehalt sowie von der einsetzbaren Verdichtungsenergie ab. Erfahrungsgemäß lässt sich eine Optimierung der Frischbetonzusammensetzung nur produktionsspezifisch durchführen. Dabei ist die vertretbare Schwankungsbreite beim Wassergehalt sehr gering, weil die Spanne zwischen der Wassermenge im Fein-

mörtel, die eine möglichst gute Verdichtbarkeit erlaubt, und derjenigen, die die nötige Formstabilität bzw. das Zusammenhaltevermögen/die Kohäsion ergibt, sehr eng ist. Ein Maß für die Grünstandfestigkeit ist die Grün-Druckfestigkeit, d. h. die Festigkeit eines sofort entformten, also noch nicht hydraulisch erhärteten Betonkörpers (s. Abschnitt II.9.4).

Neben diesen beiden Herstellmöglichkeiten, für die je nach Zusammensetzung Normal- oder Leichtbeton oder auch hochfeste Betone eingesetzt werden können, kommen in Betonwerken die beiden nachfolgend beschriebenen Betonarten zum Einsatz, wenn Bauteile mit hoher Wärmedämmung gefordert sind.

Haufwerksporiger Leichtbeton

Eine spezielle Variante des Leichtbetons ist der *haufwerksporige Leichtbeton*. Er besteht aus Leichtzuschlägen gem. DIN 4226-2, die mit Zementleim bzw. -mörtel umhüllt und punktweise verbunden bzw. „verklebt" sind. Das Porenvolumen kann durch die Zusammensetzung der Mischung, d. h. durch die Kornabstufung des Zuschlags, den Leim- bzw. Mörtelgehalt sowie deren Zusammensetzung und Konsistenz variiert werden. Dadurch können *Rohdichten*, z. B. bei Wänden gem. DIN 4232, zwischen 0,5 und 2,0 kg/dm^3 sowie Festigkeiten von LB 2 bis LB 8 eingestellt werden. Entsprechend der Rohdichteunterschiede variieren auch die Wärmedämmfähigkeiten. Im Bereich der Rohdichte von 0,6 bis 0,8 kg/dm^3 liegen die Rechenwerte der *Wärmeleitfähigkeit* bei 0,15 bis 0,24 W/m · K. In ähnlicher Größenordnung liegen die Werte für gemauerte Wände aus haufwerksporigen Leichtbetonsteinen [Bra1].

Aus haufwerksporigem Leichtbeton werden Mauersteine und unbewehrte Platten für Wände sowie großformatige Wand- und Deckenbauteile gefertigt.

Haufwerksporige, mit Normalzuschlag hergestellte Betone, d. h. Einkornbetone, eignen sich aufgrund der Porosität für Drainage- oder versickerungsfähige Betonwaren, z. B. Filterrohre oder wasserdurchlässige Pflastersteine.

Porenbeton

Porenbeton ist hinsichtlich der Porenstruktur und der mineralischen Matrix eine besondere Art des Leichtbetons. Er wird hergestellt, indem einem Mörtel aus feingemahlenem, quarzhaltigen Sand, Zement und/oder Kalk und Wasser ein Treibmittel, z. B. Aluminiumpulver, zugesetzt wird. Bei der Reaktion des Aluminiums mit dem alkalischen Wasser entsteht Wasserstoff, der den Mörtel aufbläht und dabei die Makroporen mit einem Durchmesser von 0,5 bis 1,5 mm bildet. Es erfolgt eine Dampfhärtung im Autoklaven bei rd. 190 °C und einem Druck von 12 bar innerhalb von sechs bis zwölf Stunden. Dadurch bildet sich die druckfeste Mörtelmatrix, die im Wesentlichen aus Calzium-Silicat-Hydraten besteht.

Die Rohdichte dieses porösen mineralischen Baustoffs liegt zwischen 0,30 und 1,00 kg/dm³ und die Druckfestigkeit zwischen 2,5 und 10,0 N/mm². Aufgrund des hohen Porenvolumens – rd. 80 Vol.-% im unteren Rohdichtebereich – besitzt Porenbeton eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,15 bis 0,20 W/m · K.

Aus Porenbeton werden Mauersteine, Bauplatten und großformatige bewehrte Bauteile gefertigt [Web2].

11.2 Wärmebehandlung von Beton

Die Steigerung der Frühfestigkeit von Beton kann neben gezielten betontechnologischen Maßnahmen durch eine Erhöhung der *Frischbetontemperatur (Warmbeton)* oder durch eine Wärmezufuhr nach dem Verdichten des Betons *(Wärmebehandlung)* erreicht werden.

Wenngleich derzeit aus Gründen der Energieeinsparung die Erhärtungsbeschleunigung durch Wärmezufuhr nur noch in relativ geringem Umfang angewendet wird, so kann sie dennoch bei bestimmten Serienfertigungen technisch und wirtschaftlich von Vorteil sein. Eine ohne Energieverbrauch mögliche und daher immer stärker verbreitete „Wärmebehandlung" in Betonwerken ist die Ausnutzung der Hydratationswärme, z. B. durch wärmeisolierte Abdeckungen von Formtischen oder die Lagerung von erhärtenden Betonwaren in geschlossenen und isolierten Hochregallagern.

Zur Ausführung einer schnelleren Betonerhärtung mittels Zufuhr von Wärme enthält die „Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton" des DAfStb [Ri17] Hinweise zu den Maßnahmen und Grenzwerten für die einzuhaltenden Temperaturen in den einzelnen Phasen der Wärmebehandlung. Aus Gründen der *Dauerhaftigkeit* müssen bei der Wärmebehandlung Temperaturgrenzwerte in Abhängigkeit von den Nutzungsbedingungen der Bauteile – trockene (WO) oder feuchte (WF) Umgebung – eingehalten werden. Die Richtlinie gilt sowohl für das Erwärmen des Frischbetons als auch für die Wärmebehandlung. Mit den Temperaturvorgaben sollen Gefügestörungen infolge Wärmedehnung während der Wärmebehandlung sowie Gefügeschäden infolge sekundärer *Phasenneubildungen*, z. B. Ettringit- bzw. Thaumasitbildung, (s. Abschnitt I.5.8) vermieden werden [Odl3, Ale1, Hei1].

Für die „Erhöhung der Frischbetontemperatur" gibt es zwei Möglichkeiten, das Vorwärmen einzelner Ausgangsstoffe oder das Dampfmischen. Bei letzterem wird während des Mischvorgangs Wärme in Form von Dampf dem Beton zugeführt. Durch eine Erhöhung der Frischbetontemperatur von 20 °C auf 40 °C kann in den ersten sechs bis neun Stunden eine rd. doppelt so hohe Frühfestigkeit erzielt werden. Die Festigkeitsentwicklung im frühen Stadium lässt sich vor allem beim Warmbeton

Tafel II.11.2-1: Grenzwerte für das Erwärmen des Frischbetons [Ri17]

Maximaltemperatur in °C	Nutzungsbedingungen	
	trocken WO	feucht WF
im verdichteten Frischbeton	50	30
im Beton während der Erhärtung	80*)	80*)

*) Einzelwerte dürfen um bis zu 5 °C höher sein

dadurch steigern, dass der Beton nach dem Verdichten vor Abkühlung geschützt gelagert wird. Durch die Erwärmung des Frischbetons kann bei Zement einer höheren Festigkeitsklasse die Verarbeitbarkeit der Mischung deutlich verkürzt werden; dies umso stärker, je steifer die Ausgangskonsistenz des Betons ist. Diese Wirkung muss durch Erstprüfungen (Eignungsprüfungen) überprüft werden.

Zur Anwendung des Dampfmisch-Verfahrens enthält das „Merkblatt für die Anwendung des Betonmischens mit Dampfzuführung" [Me2] Hinweise und Anforderungen zur Verfahrensweise. Diese sind zu beachten, wenn die in E DIN 1045-2 genannte Grenze von 30 °C für die Frischbetontemperatur überschritten werden soll. Die Maximaltemperaturen bei einer Frischbetonerwärmung sind gemäß der Wärmebehandlungsrichtlinie des DAfStb je nach Nutzungsbedingungen **(Tafel II.11.2-1)** für die Bauteile festzulegen.

Für eine „Wärmebehandlung", d. h. das Erwärmen des in die Schalung/Form eingebrachten verdichteten Betons, gibt es verschiedene Verfahren. Die verbreitetste ist die Dampfbehandlung; hierbei wird der Beton in besonderen Kammern einer Wärmezufuhr durch ungespannten Dampf ausgesetzt. Weitere Möglich-

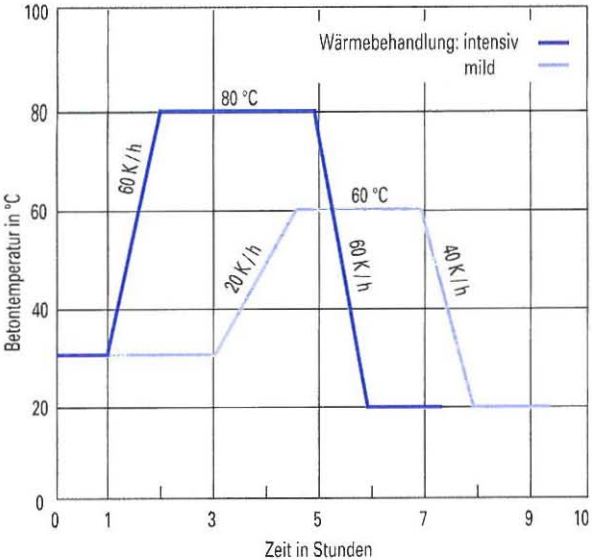


Bild II.11.2-1: Beispiele für Temperatur/Zeit-Verläufe von Wärmebehandlungsprogrammen unterschiedlicher Intensität

keiten sind das Beheizen der Schalungen, Warmluftbehandlungen sowie auch Infrarotbestrahlung oder Mikrowellenaufheizung.

Durch die Temperaturen und den zeitlichen Ablauf einer Wärmebehandlung, d. h. Temperatur und Zeitspanne bis zum Beginn der Aufheizung (Vorlagerung), Höhe der Maximaltemperatur und Dauer der Haltephase, können die Höhe der Frühfestigkeit und der Zeitpunkt, zu dem sie erreicht sein soll, in einer relativ weiten Spanne variiert werden. Je höher die Festigkeit und je

Tafel II.11.2-2: Grenzwerte für eine Wärmebehandlung von Beton in der Form nach dem Verdichten [Ri17]

Kriterien			Nutzungsbedingungen trocken WO	feucht WF	
Vorlagerung	Mindestdauer	h	1	alternativ 3	4
	Temperatur im Beton	°C	30	30	40
Temperatur im Beton während der Erhärtung		°C	80*)	60*)	
Aufheizrate		K/h	20	20	

*) Einzelwerte dürfen um bis zu 5 °C höher sein

kürzer der Zeitraum für die Erhärtung sein soll, desto intensiver muss die Wärmebehandlung sein. **Bild II.11.2-1** zeigt Temperatur/Zeit-Verläufe für unterschiedlich intensive Wärmebehandlungsprogramme. Mit steigender Intensität, d. h. früher Erwärmungsbeginn und hohe Maximaltemperatur, steigt allerdings das Risiko einer Beeinträchtigung der Betonfestigkeit und der Dauerhaftigkeit. Die Richtlinie des DAfStb für die Ausführung der Wärmebehandlung von Beton enthält Temperaturgrenzwerte **(Tafel II.11.2-2),** bei denen ungünstige Auswirkungen für die langfristige Gebrauchstauglichkeit der Bauteile nicht eintreten. Die Richtlinie enthält darüber hinaus grundlegende Erläuterungen zu Sinn und Zweck dieser Vorgaben. In [Syl1, Nec3, Wis7] sind weitergehend und praxisbezogen die chemisch-mineralogischen und die betontechnologischen Zusammenhänge dargestellt, die zu Langzeitschäden führen können, und es werden Angaben gemacht, wie diese zu vermeiden sind.

Die Einhaltung vor allem der Zeit- und Temperaturvorgaben für die Vorlagerung sind notwendig, um Dauerhaftigkeitsschäden

zu vermeiden. Durch eine zu kurze Vorlagerung, bis zur Erhöhung der Temperatur, können Gefügestörungen infolge des unterschiedlichen Wärmedehnverhaltens von ungebundenem Wasser und den Feststoffen im Frischbeton (bzw. jungen Beton) verursacht werden. Zum anderen kann die Sulfatbindung (primäre Ettringitbildung) behindert werden. Bei derart vorgeschädigten Bauteilen, die beispielsweise als Außenbauteile der Feuchte ausgesetzt sind, kann Wasser in das Gefüge eindringen. Frostwechsel können zu einer fortschreitenden Gefügeschädigung führen. Nicht ausreichend gebundenes, d. h. durch Lösung mobilisierbares Sulfat, kann zu Phasenneubildungen, wie Ettringit und Thaumasit, führen, die zu weiteren Gefügestörungen beitragen. Wie sich in der Praxis gezeigt hat, treten im Laufe der Nutzungsdauer bei derartig vorgeschädigtem Beton Rissstrukturen auf, die dreidimensional kontinuierlich anwachsen, und die Festigkeit nimmt sukzessive ab.

12 Verkehrswegebau

12.1 Übersicht über zementgebundene Bauweisen

Zementgebundene Bauweisen werden in allen Bereichen des Verkehrswegebaus – insbesondere als Trag- und Deckschichten in einer Vielzahl von Anwendungen – eingesetzt. Hierzu zählen z. B. die Befestigung von Verkehrs- und Abstellflächen aller Art mit zementgebundenen Tragschichten und Deckschichten aus Beton bzw. Betonsteinpflaster und die Verwendung als Fahrweg im Eisenbahnoberbau – die Feste Fahrbahn. Darüber hinaus wird Beton zunehmend auch zum Bau von Schutzwänden verwendet.

12.2 Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln

Tragschichten sind der untere Teil des Oberbaus. Sie liegen zwischen der Decke (Asphalt, Beton, Beton- oder Natursteinpflaster) und dem Unterbau bzw. Untergrund. Die Bezeichnung „Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln" ist als übergeordneter Begriff zu verstehen und beinhaltet hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT), Verfestigungen und Betontragschichten nach ZTVT-StB [Ri52] sowie Walzbetontragschichten nach dem „Merkblatt für den Bau von Tragschichten und Tragdeckschichten mit Walzbeton für Verkehrsflächen" [Me100]. In Abgrenzung zu der Verfestigung als Tragschicht im Oberbau nach ZTVT-StB muss die Bodenverfestigung nach ZTVE-StB [Ri55] gesehen werden, die sich auf die obere Zone des Unterbaus bzw. Untergrunds bezieht und nicht dem Oberbau zugerechnet wird.

Hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) bestehen aus güteüberwachten Mineralstoffgemischen mit definierter Kornzusammensetzung. Das Baustoffgemisch wird ausschließlich in Mischanlagen gemischt und in der Regel mit einem Fertiger eingebaut. Im Gegensatz hierzu ist für eine Verfestigung keine bestimmte Kornzusammensetzung des zu verfestigenden Bodens bzw. Mineralstoffgemischs erforderlich und das Baustoffgemisch kann im Baumischverfahren mit einer Fräse oder in einer Mischanlage hergestellt werden. Die für die geforderte Druckfestigkeit und Frostsicherheit maßgebende Zusammensetzung wird bei der Eignungsprüfung nach TP-HGT [Ri50] festgelegt. Die Druckfestigkeit der Tragschicht muss unter einer Betondecke mindestens 15 N/mm^2 und bei einer Tragschicht unter einer Asphaltdecke mindestens 7 N/mm^2 betragen. Die höhere Druckfestigkeit einer Tragschicht unter Betondecken soll einer Erosion der Tragschicht vorbeugen, die bei einigen alten Strecken, insbesondere unter den Fugen der Betondecken, festgestellt worden war.

Betontragschichten sind Tragschichten aus Beton nach DIN 1045 und werden mit einem Fertiger eingebaut. Der Beton muss den Festigkeitsklassen B 15 oder B 25 nach DIN 1045 entsprechen.

Deckendicke und Anordnung der drei Tragschichtvarianten sind in den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen" (RStO) [Ri58] festgelegt. In der Regel beträgt die Dicke der Tragschicht 15 cm.

Walzbetontragschichten haben sich bisher noch nicht als RStO-Standardbauweise durchgesetzt. Die Tragschicht muss eine Druckfestigkeit von mindestens 30 N/mm^2 aufweisen. Die Ausführungstechnik ist vergleichbar mit einer HGT. Das erdfeuchte Baustoffgemisch der Tragschichten wird mit einem Fertiger eingebracht und durch Walzen verdichtet. Ausführungsbeispiele

zeigen, dass die Festigkeit auch wesentlich höher sein kann und der eines Fahrbahndeckenbetons entspricht.

Als Bindemittel können Zemente nach DIN 1164, mit Ausnahme der Betontragschichten Tragschichtbinder nach DIN 18506 oder bauaufsichtlich zugelassene Bindemittel verwendet werden. Um eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit des frischen Baustoffgemischs zur Verfügung zu haben, sollen schnell erstarrende Bindemittel nicht verwendet werden. Hydrophobierte Zemente verhindern eine ungewollte, vorzeitige Hydratation und ermöglichen – insbesondere bei Anwendung des Baumischverfahrens – längere Verarbeitbarkeitszeiten. Für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen nach ZTVE-StB kann über die genannten Bindemittel hinaus auch Baukalk nach DIN 1060 eingesetzt werden.

Die Zuschläge (Böden und Mineralstoffgemische) für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln müssen die Anforderungen der TL Min-StB [Ri45] und zusätzlich die Anforderungen der DIN 4226 an schädliche Bestandteile und gegebenenfalls an gebrochene Hochofenschlacken erfüllen. Wenn industrielle Nebenprodukte oder Recyclingbaustoffe verwendet werden, muss über den Nachweis der bautechnischen Eignung hinaus, unter Beachtung der Bauweise, der Einbauart und des Einbauortes, der Nachweis der wasserwirtschaftlichen Unbedenklichkeit erbracht werden [Me90, Ri60]. Mineralstoffe, wie z. B Stahlwerksschlacke, Schmelzkammergranulat, Steinkohlenflugasche, Hausmüllverbrennungsasche und Recyclingbaustoffe, wie z. B. pechhaltiger Altasphalt, gelten als wasserwirtschaftlich unbedenklich, wenn festgelegte Schadstoffkonzentrationen – ermittelt am Feststoff bzw. Eluat – nicht überschritten werden [Ri60]. Durch die Aufbereitung mit hydraulischen Bindemitteln werden Schadstoffe in ein dichtes Tragschichtgefüge sicher eingebunden, wobei der Durchlässigkeitsbeiwert k der Tragschicht

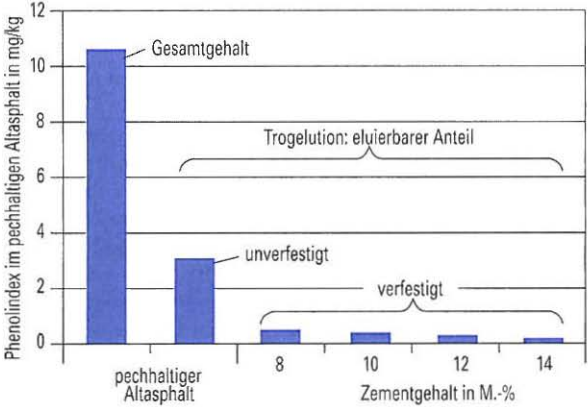


Bild II.12-1: Gesamtgehalt an Phenolen in pechhaltigem Altasphalt und eluierbarer Anteil ohne und mit Zementverfestigung

kleiner als $1 \cdot 10^{-9}$ m/s betragen sollte [Sch16]. Zusätzlich wird durch eine dichte Überbauung und eine kapillarbrechende Unterlage der Auslaugung von Schadstoffen vorgebeugt. Im Fall von pechhaltigem Altasphalt gelingt es z. B., die Auslaugbarkeit durch eine Zementverfestigung im Vergleich zu den ungebundenen Materialien, im Bild II.12-1 [Eic3] dargestellt am Beispiel der Phenolkonzentration, um rd. 97% zu verringern. In Sonderfällen werden auch spezielle Recyclingbinder eingesetzt, die die Schadstoffe wirksamer als herkömmliche Bindemittel immobilisieren [Eic3, Vog1].

Neben den o. g. dichten Tragschichten werden auch wasserdurchlässige Tragschichten (Dränbetontragschichten) [Me101], z. B. unter wasserdurchlässigen Deckschichten zur „Entsiege-

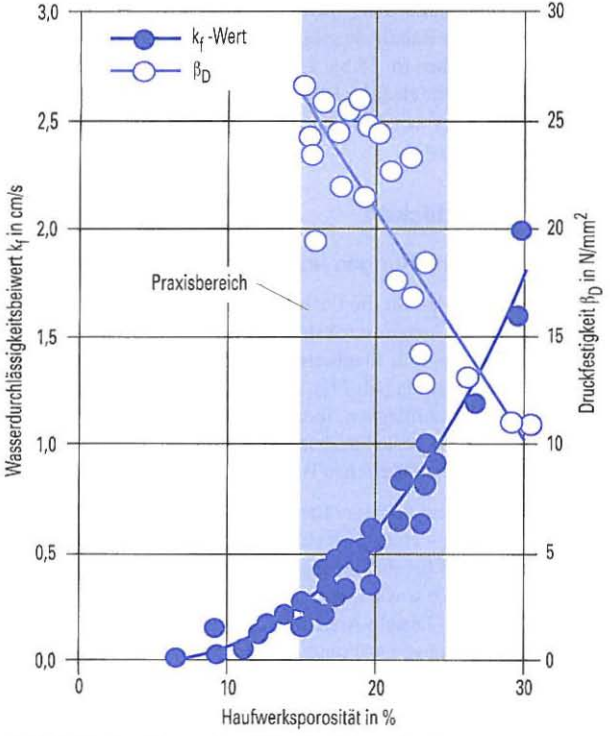


Bild II.12-2: Wasserdurchlässige Tragschicht unter Verwendung von Splittsand. Druckfestigkeit β_D und Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f in Abhängigkeit von der Haufwerksporosität

lung" von Verkehrsflächen [Me98] oder bei entwässerungstechnisch schwierigen Randbedingungen, eingebaut. Bei einem Porenraum zwischen rd. 15 bis 25% beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert k mehr als $0{,}1 \cdot 10^{-2}$ m/s und die Druckfestigkeit mehr als 12 N/mm² bei einem ausreichenden Frostwiderstand **(Bild II.12-2)** [Eic4].

12.3 Betondecken

12.3.1 Beanspruchungen und Konstruktionsmerkmale

Betondecken werden für die Befestigung von Verkehrsflächen, wie z. B. hochbelasteten Autobahnen und geringer belasteten Straßen und Wegen, für Flugbetriebsflächen (Start- und Ladebahnen, Abstellflächen [Me99]), für Flächenbefestigungen für die Industrie (Abstellflächen, Industrieböden) und seit einigen Jahren auch für die Feste Fahrbahn aus Beton für die Neu- und Ausbaustrecken der Deutschen Bahn AG verwendet.

Der Beton unterliegt dabei im Laufe seiner Lebensdauer – je nach Verwendung – einer Vielzahl von Einwirkungen aus dem Verkehr und den Klimabedingungen infolge Temperatur- und Feuchteänderungen sowie infolge von Frost und bei Verwendung von Tausalz Frost-Tausalz-Angriffen. Damit die Betondecke diese Beanspruchungen während einer langen Nutzungsdauer aufnehmen kann, muss die Gesamtkonstruktion aus Decke, Tragschicht, Unterlage und dem Entwässerungssystem auf die jeweils vorliegenden Verhältnisse abgestimmt werden. Gesicherte Erkenntnisse über den Aufbau und die Querschnittsgestaltung von Betonfahrbahnen liegen vor. In der Regel erfolgt eine standardisierte Bemessung gemäß den RStO und nur in Sonderfällen (z. B. Flugplatzdecken oder Feste Fahrbahn) eine Einzelbemessung. Die RStO unterscheiden für Fahrbahnen und Verkehrsflächen entsprechend der Verkehrsbelastung die Bauklassen SV

(hochbelastete Autobahnen) und I bis VI (Parkplätze). Baugrundsätze, Baustoffe und Ausführung von Fahrbahndecken aus Beton sind in den ZTV Beton-StB [Ri49] geregelt.

Betondecken werden in einschichtiger Bauweise oder in zweischichtiger Bauweise aus Unterbeton und in der Regel mindestens 7 cm dickem Oberbeton hergestellt. In Deutschland hat sich die raumfugenlose Bauweise mit unbewehrten Platten durchgesetzt. Die Plattenlänge und -breite sollen in der Regel das 25-fache der Plattendicke nicht überschreiten. Der übliche Querfugenabstand beträgt im Straßenbau 5 m. Die Querkraftübertragung an den Querfugen wird durch eine Verdübelung erhöht. Zusätzlich werden die Längsfugen zur Verhinderung des Auseinanderwanderns der Platten verankert. Die Fugen werden zur Vermeidung des Eindringens von Wasser in die Konstruktion mit Fugenfüllstoffen (z. B. bitumöse Vergussmassen oder elastische Fugenprofile) verschlossen.

Betondecken werden überwiegend mit Gleitschalungsfertigern eingebaut. Dübel und Anker werden in den Beton eingerüttelt. Nach dem Verdichten des Betons wird die Betonoberfläche in Querrichtung durch die Glättbohle und anschließend in Längsrichtung durch den Längsglätter geglättet. Um eine griffige und lärmarme Betondecke zu erhalten, wird die frische Betonoberfläche durch Nachschleppen eines Jutetuchs texturiert. Die Betonoberfläche muss sofort nach der Herstellung gegen Austrocknen geschützt werden. In der Regel wird ein Nachbehandlungsmittel aufgesprüht. Zur Vermeidung einer ungeregelten Rissbildung werden frühzeitig Fugen geschnitten.

Betonfahrbahndecken zählen im Gebrauchszustand zu den am höchsten beanspruchten, unbewehrten Betonbauteilen. An den Beton müssen daher sehr hohe Anforderungen gestellt werden **(Tafel II.12-1)**. Für Autobahnen wird ein B 35 (DIN 1045 (7.88)) gefordert, in Sonderfällen – z. B. bei Flugbetriebsflächen – wer-

Tafel II.12-1: Anforderungen an Fahrbahndeckenbeton nach ZTV Beton-StB [Ri49]

	Bauklasse
Zementgehalt	SV, I bis VI SV, I bis III
Kornzusammensetzung des Zuschlags	SV, I bis IV
	V und VI
Mehlkorn- und Feinstsandgehalt	SV, I bis VI
Mindestluftgehalt des Frischbetons[4)]	SV, I bis VI
Druckfestigkeit	SV, I bis IV
	V und VI
Biegezugfestigkeit[7)]	SV, I bis IV
	V und VI

Anforderungen		
Festlegung aufgrund einer Eignungsprüfung ≥350 kg/m³ verdichteten Frischbetons		
– mind. 3 Korngruppen: 0/2, 2/8, >8 mm oder 0/4, 4/8, >8 mm[1)] – Größtkorn: 8 mm, 16 mm, 22 mm oder 32 mm – Siebdurchgang 1 mm ≤27 M.-%, 2 mm ≤30 M.-%[2)]		
– mind. 2 Korngruppen: 0/4 und >4 mm – Größtkorn: 8 mm, 16 mm, 22 mm oder 32 mm		
– allgemein ≤450 kg/m³ verdichteten Frischbetons[3)] – für Beton mit Fließmitteln ≤500 kg/m³ verdichteten Frischbetons		
– für Beton ohne BV oder FM:	Einzelwert	>3,5 Vol.-%
	Tagesmittelwert	>4,0 Vol.-%
– für Beton mit BV und/oder FM[5)]:	Einzelwert	>4,5 Vol.-%
	Tagesmittelwert	>5,0 Vol.-%
nach 2 Tagen:[6)]	$\beta_{WN} \geq 25$ N/mm²;	$\beta_{WS} \geq 28$ N/mm²
nach 28 Tagen:	$\beta_{WN} \geq 35$ N/mm²;	$\beta_{WS} \geq 40$ N/mm²
nach 2 Tagen:[6)]	$\beta_{WN} \geq 18$ N/mm²;	$\beta_{WS} \geq 21$ N/mm²
nach 28 Tagen:	$\beta_{WN} \geq 25$ N/mm²;	$\beta_{WS} \geq 30$ N/mm²
≥5,5 N/mm²		
≥4,0 N/mm²		

[1)] Größtkorn 8 mm: 0/2, ≤ 8 mm.

[2)] Größtkorn 8 mm: ≤ 35 M.-%.

[3)] Größtkorn 8 mm: ≤ 500 kg/m³.

[4)] Bei Zuschlagsgemischen von 16 mm Größtkorn ist der Mindestluftgehalt des Frischbetons um 0,5 Vol.-% und bei 8 mm Größtkorn um 1,5 Vol.-% zu erhöhen.

[5)] Werden bei der Eignungsprüfung die Luftporenkennwerte bestimmt und werden hierbei der Abstandsfaktor 0,20 mm nicht überschritten und der Gehalt an Mikroluftporen L 300 von 1,8 Vol.-% nicht unterschritten, ist ein Mindestluftgehalt wie für Beton ohne BV oder FM ausreichend.

[6)] Gilt nur für frühhochfesten Straßenbeton mit FM

[1] Nur bei der Eignungsprüfung nachzuweisen

den z. T. auch höhere Festigkeiten (B 45) verlangt. Weitere Anforderungen sind insbesondere für öffentliche Verkehrsflächen notwendig, z. B. ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand sowie ein hoher Abriebwiderstand für eine ausreichende Griffigkeit und Dauerhaftigkeit der Oberflächentexturierung.

12.3.2 Betontechnologie

Für die Herstellung des Betons gelten DIN 1045, DIN 1048 und ZTV Beton-StB. Die Anforderungen an den Beton, die Ausgangsstoffe und die Betonzusammensetzung sind in den **Tafeln II.12-1** und **II.12-2** zusammengestellt.

Zement: Die Zemente müssen DIN 1164-1 entsprechen. In der Regel wird ein Portlandzement CEM I 32,5 R verwendet, in Abstimmung mit dem Auftraggeber können auch die in Tafel II.12-2 aufgeführten CEM II- und CEM III-Zemente eingesetzt werden. Damit der Beton ohne Schwierigkeiten eingebaut werden kann, darf das Erstarren frühestens 2 Stunden nach dem Anmachen beginnen. Für Portlandzement CEM I 32,5 R gelten darüber hinaus zusätzliche Anforderungen (Tafel II.12-2). Unabhängig von der Festigkeitsklasse gilt für alle Zemente, dass der Gesamtalkaligehalt 1,0 M.-% nicht überschreiten darf. Diese Festlegung erfolgte auf Grund von Rissbildungen einiger Decken, bei denen Zement mit hohem Alkaligehalt verwendet wurde. Als Ursache der Rissbildung wurde ein stärkeres Quellen und Schwinden des Betons und der damit verbundenen Ausbildung erhöhter Eigenspannungen bei Verwendung von Zement mit hohem Alkaligehalt genannt [Fle1]. Ein systematischer und baupraktisch relevanter Einfluss der Zementeigenschaften auf das Schwind- und Quellverhalten konnte aber nicht bestätigt werden (s. Abschnitt II.6.3.1) [Eic1].

Zur Erhärtungsbeschleunigung des Betons und bei kühlerer Witterung können Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 R zweck-

mäßig sein. Bei zweischichtigen Decken müssen Ober- und Unterbeton mit Zement der gleichen Art und Festigkeitsklasse hergestellt werden.

Zuschlag: Der Zuschlag für Deckenbeton muss den Anforderungen der DIN 4226 entsprechen und gem. DIN 4226 bzw. den RG Min.-StB [Ri46] güteüberwacht sein. Für Oberbeton ist Zuschlag mit erhöhten Anforderungen vorzusehen. Bei der Verwendung im Unterbeton werden geringere Anforderungen gestellt. Der vorgeschriebene Anteil an gebrochenem Zuschlag (s. Tafel II.12-2) muss die erhöhten Anforderungen an die Kornform für Edelsplitt erfüllen. Die Edelsplitte müssen einen hohen Widerstand gegen Polieren aufweisen. In Ausnahmefällen, z. B. für Decken auf Fahrbahnen mit langfristig besonders starker Polierbeanspruchung (z. B. Dränbeton oder Waschbeton), muss der PSV-Wert ≥ 53 (Polished Stone Value) betragen. Besteht der Verdacht, dass der Zuschlag alkaliempfindliche Bestandteile in schädlichen Mengen enthält, ist die „Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen für schädigende Alkalireaktion im Beton" des DAfStb [Ri13] zu berücksichtigen.

Zusatzmittel: Der Frost-Tausalz-Widerstand wird durch die Einführung von künstlichen Luftporen in den Beton mit Luftporenbildnern sichergestellt. Bei der Herstellung des LP-Betons ist auf eine ausreichende Mischzeit und somit vollständige Aktivierung des LP-Bildners zu achten [Me96]. Bei nicht vollständig aktivierten LP-Bildnern kann es bei einem späteren Nachmischen des Betons, z. B. während des Einbaus im Bereich der Verteilerschnecke, zu einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts kommen, sodass der erhärtete Festbeton einen überhöhten Luftgehalt aufweist. Der Mindestluftgehalt des Frischbetons muss bei Verwendung von BV und/oder FM und LP um 1 Vol.-% erhöht werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei ungünstigen Zement/Zusatzmittelkombinationen der Luftgehalt

Tafel II.12-2: Anforderungen an die Ausgangsstoffe für Fahrbahndeckenbeton nach ZTV Beton-StB [Ri49]

Ausgangsstoff	Vorschrift
Zement	DIN 1164-1
Zuschlag	DIN 4226 oder TL Min-StB und DIN 4226
Betonzusatzmittel	Prüfbescheid / Zulassung DIE
Betonzusatzstoff	DIN 1045 ode TL Min-StB

Zusätzliche Anforderungen
CEM I 32,5 R oder in Abstimmung mit dem Auftraggeber CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-L bzw. CEM III/ A (mindestens Festigkeitsklasse 42,5)
für Portlandzement CEM I 32,5 R – Mahlfeinheit ≤ 3500 cm²/g – Wasseranspruch $\leq 28{,}0$ M.-% – 2-Tage-Druckfestigkeit $\leq 29{,}0$ N/mm² für alle Zemente, unabhängig von der Festigkeitsklasse: Gesamtalkaligehalt (äquivalenter Natriumanteil) $\leq 1{,}0$ M.-% Na_2O-Äquivalent
für alle Zemente, ausgenommen Zemente für frühhochfesten Straßenbeton: Erstarrungsbeginn bei 20 °C $\geq$ 2 Stunden
für frühhochfesten Straßenbeton mit FM: Zement der Festigkeitsklasse 42,5 R
für Oberbeton bei zweischichtiger und Beton bei einschichtiger Herstellung der Decke – erhöhter Widerstand gegen Frost: Durchgang bei Frostprüfung durch maßgebendes Prüfsieb $\leq 1{,}0$ M.-%[1] – erhöhte Anforderung an den Anteil quellfähiger Bestandteile (eQ): Zuschlag ≤ 4 mm max. 0,25 M.-%; Zuschlag >4 mm: max. 0,02 M.-% – bei den Bauklassen SV, I bis III Zuschlag >8 mm mind. 50 M.-% gebrochen; mind. 35 M.-% gebrochen am Gesamtzuschlag – erhöhte Anforderungen an die Kornform (eK) – bei den Bauklassen SV, I bis III gebrochener Zuschlag >8 mm:[2] gedrungenes Korn ≥ 80 M.-%, Polierwiderstand PSV ≥ 50
›ei gleichzeitiger Verwendung von LP und FM oder LP und BV Wirk-amkeitsprüfung erforderlich, dabei Abstandsfaktor AF $\leq 0{,}20$ mm und Gehalt an Mikroluftporen L 300 $\geq 1{,}5$ Vol.-%
ine Anrechnung auf den Zementgehalt ist nicht zulässig

[1] Bei zweischichtiger Herstellung der Decke für den Unterbeton $\leq$ 2,0 M.-%

[2] Größtkorn 8 mm: gebrochener Zuschlag > 2 mm

insgesamt oder der Anteil an Mikroluftporen, z. B. durch eine entschäumende Wirkung verflüssigender Zusatzmittel, verringert werden kann [Sie7]. Auf die Erhöhung kann verzichtet werden, wenn bei der Eignungsprüfung die Luftporenkennwerte am Festbeton bestimmt und dabei bestimmte Grenzwerte eingehalten werden (Tafel II.12-1).

Betonzusammensetzung: Die Betonzusammensetzung ist aufgrund einer Eignungsprüfung festzulegen. Der Zementgehalt muss bei Decken der Bauklasse SV und I bis III mindestens 350 kg/m^3 verdichteten Frischbetons betragen. Der Wasserzementwert darf bei der Eignungsprüfung 0,45 nicht überschreiten und liegt in der Praxis zwischen 0,40 und 0,43. Die Kornzusammensetzung der Zuschläge muss den Sieblinien nach DIN 1045 entsprechen. Die Sanddosierung und der Gesamtanteil an Mehlkorn und Feinstsand werden begrenzt, um die Anreicherung von minderfestem, wasserreichem Feinmörtel an der Oberfläche zu vermeiden (Tafel II.12-1).

12.3.3 Gebrauchseigenschaften von Betonfahrbahndecken

Hauptanforderungen an die Gebrauchseigenschaften sind u. a. eine hohe Tragfähigkeit und Verformungsstabilität und eine ausreichende Dauerhaftigkeit gegenüber den Beanspruchungen aus Klima und Verkehr. Darüber hinaus sind besonders Fragen der Verkehrssicherheit (Griffigkeit, Helligkeit) und des Umweltschutzes (Lärmemission, Recyclingfähigkeit) für die Wahl einer Bauweise wichtig.

Griffigkeit: Die Griffigkeit einer Fahrbahndecke hat wesentlichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit und wird von der Textur des Oberflächenmörtels bestimmt. Infolge der verdichtenden Wirkung der Einbaugeräte bildet sich an der Oberfläche der Betondecke eine rd. 1 mm dicke Mörtelschicht. Die früher üb-

liche Texturierung des Oberflächenmörtels mit einem Querbesenstrich wurde zur Verringerung der Lärmemission durch die Längstexturierung mit einem nachgeschleppten Jutetuch ersetzt. Eine dünne obere Zone des Mörtels (Zementhaut) besteht aus Feinststoffen (Mehlkorn, d. h. Zement und Feinstsand) sowie Wasser. Diese bestimmt die Anfangsgriffigkeit, wird aber in den ersten Monaten durch Verkehr und Witterung abgetragen. Dadurch wird die zweite Zone freigelegt, die aus dem Mörtel besteht. Die Dauerhaftigkeit der Textur hängt von der Festigkeit, vom Frost-Tausalz-Widerstand und dem Abnutzwiderstand (s. Abschnitt II.7.5) des Mörtels ab. Der Mörtel soll daher einen niedrigen Wasserzementwert und einen möglichst kleinen Mehlkorngehalt aufweisen, damit bei der Herstellung der Fahrbahn keine wasserreiche Oberflächenschlämme entsteht. Der Mörtel muss zur Erzielung eines hohen Frost-Tausalz-Widerstands einen ausreichenden Gehalt an feinen Luftporen aufweisen und für einen hohen Abnutzwiderstand sowie Griffigkeit einen möglichst hohen Anteil an hartem, scharfen Sand, z. B. Quarzsand, enthalten [Bon3]. In nordischen Ländern mit Spikes-Verwendung wird dem Beton zur Erhöhung des Verschleißwiderstands Silicastaub zugegeben [Ege1].

Bisher wurden für Betonfahrbahndecken fast ausnahmslos CEM I-Zemente verwendet. Bei einem über 20 Jahre alten Autobahnabschnitt mit hüttensandhaltigem Zement (EPZ bzw. CEM II B-S) zeigten sich die gleichen günstigen Gebrauchseigenschaften wie bei gleich alten benachbarten Abschnitten mit Portlandzementen. Hinsichtlich des Einflussparameters Zementart liegen in der Literatur nur vereinzelte Ergebnisse vor, da dieser Einfluss im Vergleich zu anderen betontechnologischen Parametern bisher als untergeordnet eingeschätzt wurde [Kun1]. Nach [Saw1] liegen die Verschleißwerte von Betonen mit unterschiedlichen Zementarten innerhalb des Streubereichs des

Prüfverfahrens, sodass keine signifikanten Einflüsse der Zementart auf den Abriebwiderstand festgestellt werden können. Es dauert rd. 10 bis 20 Jahre, bis der Oberflächenmörtel durch die Beanspruchungen abgetragen wird [Fle2]. Erst dann wird die eigentliche Zusammensetzung des Betons für die Griffigkeit maßgebend, wobei das Polierverhalten der groben Zuschläge die Griffigkeit des Betons entscheidet. Die in den ZTV Beton-StB verlangten Mindestgehalte an gebrochenen Grobzuschlägen und Edelsplitten mit gedrungener Kornform in Verbindung mit einem hohen Polierwiderstand der Zuschläge wirken sich günstig auf den Polierwiderstand aus. Zur Verbesserung der Griffigkeit von alten Betonfahrbahndecken stehen Methoden, wie z. B. Beschichtungen oder Einschneiden von Rillen, zur Verfügung, die gleichzeitig günstig für die Verringerung der Geräuschentstehung sind.

Lärmemission: Die Lärmemission einer Straße resultiert hauptsächlich aus zwei Lärmquellen, aus dem Antriebsgeräusch der Fahrzeuge und dem Rollgeräusch, das bei Geschwindigkeiten von über 50 km/h dominiert [CUR3]. Das Rollgeräusch lässt sich durch die Entwicklung leiser Reifen und die Optimierung der Straßenoberflächen mindern. Vorteilhaft sind sehr ebene Fahrbahndecken ohne Querwellen, da hierdurch die Schwingungsanregung des Reifens und die damit verbundene Lärmabstrahlung verringert wird. Gleichzeitig muss die Oberfläche aber ausreichend texturiert sein, um zu verhindern, dass zwischen Reifen und Oberfläche Luft komprimiert wird, die beim Abrollen des Reifens mit einem hochfrequenten Zischen entweicht. Durch offenporige, schallabsorbierende Beläge (Dränbeton) kann zusätzlich die Ausbreitung des Antriebs- sowie des Rollgeräusches reduziert werden.

Lärmminderungspotentiale liegen daher sowohl in der Optimierung herkömmlicher gefügedichter Bauweisen als auch in der

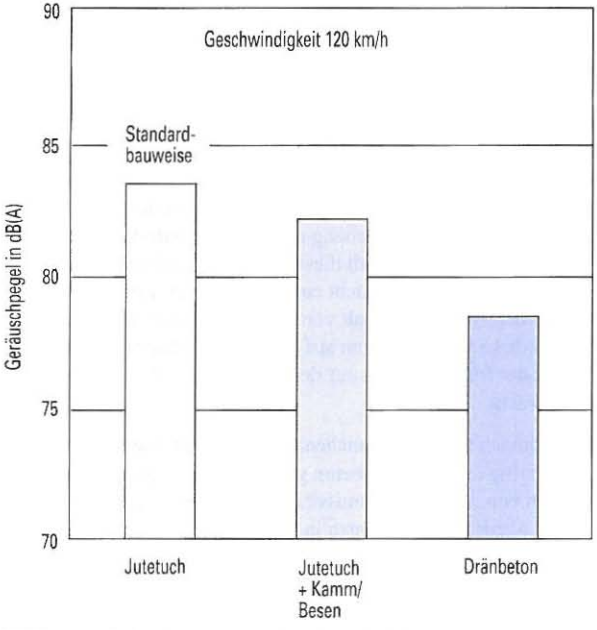


Bild II.12-3: Einfluss unterschiedlicher Betonbauweisen auf den Geräuschemissionspegel von Personenkraftfahrzeugen bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h

Entwicklung neuartiger offenporiger Beläge **(Bild II.12-3)** [Sie8]. Vorteile der offenporigen Beläge sind die gegenüber den dichten Belägen geringere Lärmemission infolge der lärmabsorbierenden Wirkung und eine erhöhte Verkehrssicherheit bei Regen aufgrund geringerer Sprühfahnenbildung und Aquaplaninggefahr.

Dränbeton für lärmmindernde Fahrbahndecken wird im Allgemeinen mit einer Ausfallkörnung hergestellt. Er enthält Splitt 5/8 und in einigen Fällen einen geringen Anteil an feinem Sand. Der Zementgehalt liegt zwischen 280 und 350 kg/m³ und der w/z-Wert bei ca. 0,25 bis 0,30. Dem Zementleim muss eine Polymersuspension zugesetzt werden, um den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Angriff zu verbessern **(Bild II.12-4)**. Die Kombination von Silicastaub und Polymer bewirkt bei der Prüfung im Labor eine deutliche Anhebung des Frost-Tausalz-Widerstands [Eic5]. Die Übertragbarkeit dieser Versuchsergebnisse auf das Praxisverhalten ist noch nicht endgültig geklärt. Der Dränbeton weist einen Hohlraumgehalt von rd. 25% auf und wird in einer Schichtdicke von 4 bis 8 cm auf den bereits erhärteten Unterbeton oder frisch in frisch auf den noch nicht erstarrten Beton aufgebracht.

Im Vergleich zu herkömmlichen, dichten Bauweisen ist die Dauerhaftigkeit von Dränbeton geringer. Versuchsstrecken im Bereich von Autobahnen mussten nach kurzer Liegedauer ausgebaut werden und erreichten in Deutschland bisher eine Lebensdauer von max. zwei bis drei Jahren. Auch im Ausland kam der Dränbeton bisher über das Stadium von Versuchsstrecken nicht hinaus [Hus1].

Die Verbesserungsmöglichkeiten bei gefügedichten Fahrbahnbelägen liegen insbesondere in einer erhöhten Ebenheit und einer wirkungsvolleren Oberflächentexturierung. Untersuchungen zeigen, dass bereits bei der Fertigung akustisch ungünstige Querwellen in den Frischbeton eingeprägt werden können. Neben verbesserten Glätteeinrichtungen kann auch die Verwendung von nachgezogenen Kämmen oder Besen zur Texturierung des Frischbetons eine akustisch günstige Oberfläche erzeugen [Kri1]. Auch Betonsteinpflasterdecken lassen sich akustisch optimieren [Ste2].

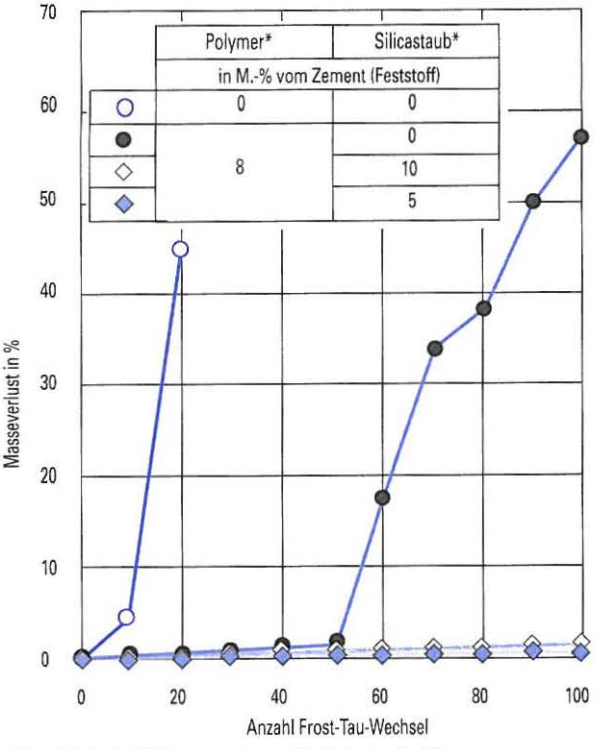


Bild II.12-4: Widerstand von Dränbetonbelägen gegen Frost/Tausalz-Beanspruchung (* Feststoffgehalt)

Recyclingfähigkeit: Baustoffe werden zunehmend auch nach ihren ökologischen Eigenschaften beurteilt. Die Wiederverwertung gewinnt zunehmend an Bedeutung, um die Ressourcen zu

schützen und die Beseitigung auf Deponien zu vermeiden. Mit der möglichst hochwertigen Wiederverwertung von Recyclingbaustoffen leistet der Straßenbau einen wichtigen Beitrag für den Baustoffkreislauf. Insbesondere Fahrbahndeckenbeton ist im Gegensatz zu Bauschutt aus dem Abbruch von Gebäuden ein sehr hochwertiger und gleichmäßiger Baustoff. Nach rd. 30 Jahren Liegezeit kann Straßenbeton eine Druckfestigkeit von bis zu 100 N/mm² erreichen [Eic6]. Im Bereich des Straßenbaus wird rezyklierter Zuschlag aus diesem hochwertigen Altbeton bereits seit langem für den Bau neuer Betondecken eingesetzt. In der Regel wird der rezyklierte Zuschlag nur für den Unterbeton verwendet, während der Oberbeton fast ausschließlich mit herkömmlichen Zuschlägen hergestellt wird. Der Anwendungsbereich beschränkt sich dabei auf Betonsplitt >2 mm [Me93]. Der anfallende Betonbrechsand wird überwiegend in Frostschutzschichten und hydraulisch gebundenen Tragschichten eingesetzt. Untersuchungen zur Wiederverwertung des Brechsands in neuem Straßenbeton [Eic6] zeigen, dass mit steigendem Brechsandanteil die Fließmittel- und die Luftporenbildnerzugabe erhöht werden müssen, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit und einen ausreichenden Luftporengehalt sicherzustellen. Die Festigkeitseigenschaften und der Frost-Tausalz-Widerstand werden durch eine Erhöhung des Brechsandgehalts nur unwesentlich beeinflusst, während das Schwinden und Quellen z. T. erheblich vergrößert und der Verschleißwiderstand verringert wird. Es sollte daher nur höchstens 25% des bisher verwendeten Natursands gegen Betonbrechsand ausgetauscht und die Verwendung auf den Unterbeton beschränkt werden.

12.4 Feste Fahrbahn

Die bisher fertig gestellten Neu- und Ausbaustrecken der Deutschen Bundesbahn wurden überwiegend als Querschwellengleis

mit Schotteroberbau ausgeführt. Mit Zuggeschwindigkeiten über 200 km/h steigt aber die Beanspruchung des Fahrwegs, sodass sich die Gleislage des Schotteroberbaus nach kurzer Betriebszeit verschlechtert. Die für die Instandsetzungsarbeiten des Schotteroberbaus notwendigen Sperrungen führen zu einer Verringerung der Verfügbarkeit des Fahrwegs. Wegen der zunehmenden Beanspruchung des Oberbaus bei den hohen Geschwindigkeiten wird von der Deutschen Bahn AG für Neu- und Ausbaustrecken daher ein wartungsarmer schotterloser Oberbau, die *Feste Fahrbahn*, gefordert. Sie ist der konventionellen Schotterbauweise technisch und wirtschaftlich überlegen. Die Feste Fahrbahn zeichnet sich durch eine lange Lebensdauer (projektierte Nutzungsdauer: 60 Jahre), geringen Instandhaltungsaufwand, hohe Sicherheit und eine unveränderlich genaue Gleislage aus. Die Konstruktion kann in Beton oder Asphalt ausgeführt werden. Insgesamt wurden bisher rd. 150 km Feste Fahrbahn gebaut, wobei der Anteil der Betonbauweise bei rd. 70% liegt. Die verschiedenen Oberbaukonstruktionen sind in einem Anforderungskatalog der DB AG [Deu1] festgelegt. Die Tragplatte aus Beton der Festigkeitsklasse B 35 (DIN 1045 (7.88)) liegt dabei i.d.R. auf einer Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel (ZTVT-StB) auf. Entsprechend dem Anforderungskatalog der DB AG muss der Beton die Anforderungen der ZTV Beton-StB erfüllen.

Neue Oberbaukonstruktionen müssen vor einer unbeschränkten Anwendung gutachterlich geprüft und vom Eisenbahnbundesamt (EBA) zugelassen werden. Die Zulassung als Regelbauart setzt einen mehrjährigen Betriebsversuch im Gleisnetz der DB AG voraus. Alle bisherigen Bauarten für die Feste Fahrbahn verwenden noch einen konventionellen Gleisrost, der mit der Tragplatte entweder monolithisch oder mit Verankerungselementen verbunden wird. Andere Bauweisen befinden sich zz. auf verschiedenen Abschnitten der DB AG in der Erprobung [Dar1].

12.5 Betonschutzwände

Betonschutzwände kommen insbesondere dort zum Einsatz, wo eine hohe Sicherheit gegen ein Überfahren oder Durchbrechen der Schutzeinrichtung gefordert ist oder wo der nötige Platz für nachgiebige Konstruktionen, z. B. Stahlschutzplanken, nicht vorhanden ist. Bei schmalen Mittel- oder Trennstreifen hochbelasteter Straßen werden doppelseitige Betonschutzwände eingesetzt. Einseitige Betonschutzwände sichern Lärmschutzwände, schutzwürdige Anlagen, wie z. B. Hochspannungsmasten oder tragende Bauteile. Daneben werden sie zum Schutz und zur Abtrennung von parallel laufenden Verkehrswegen, wie z. B. Straßen- und Schienenbahnen, verwendet. Durch die bei Kollisionen auftretenden Anpralllasten werden die Betonschutzwände in der Regel nicht beschädigt, sodass aufwendige Unterhaltungs- und Erneuerungsarbeiten und damit verbundene Verkehrsbehinderungen nach einem Unfall vermieden werden.

Betonschutzwände werden entweder als Fertigteile oder in Ortbetonbauweise mit einem Gleitschalungsfertiger hergestellt. Betonschutzwände in Ortbetonbauweise müssen den ZTV-PS 98 [Ri61] und Betonschutzwandfertigteile den TL BSWF 96 [Ri62] entsprechen. Um ein Herausbrechen von größeren Betonteilen bei schweren Anprallvorgängen zu verhindern, werden die Ortbeton- bzw. Fertigteilschutzwände mit Stabstählen gesichert. Eine konstruktive Bewehrung ist im Regelfall nicht erforderlich. Die Betonschutzwand ist mit einem Beton mit hohem Frost- und Tausalz-Widerstand der Betonfestigkeitsklasse B 35 herzustellen. Für Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung gilt DIN 1045 (7.88). Der Zementgehalt muss mindestens 320 kg/m^3 betragen. Der Beton ist als LP-Beton mit einem Wasserzementwert $< 0{,}50$ herzustellen.

3.2 Entwurfsgrundlagen für Frischbeton

Die maßgebenden Anforderungen an den *Frischbeton* ergeben sich aus dem vorgesehenen Ablauf für das Herstellen, Transportieren und Verarbeiten des Betons sowie aus den erforderlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften während der Verarbeitungsdauer. Die dafür in Frage kommenden Beurteilungskriterien sind als Frischbetoneigenschaften in Tafel II.3.1-2 genannt.

Die wichtigsten Frischbetoneigenschaften sind die *Konsistenz* als Maß für die *Verarbeitbarkeit* und die *Verarbeitbarkeitszeit* nach Ankunft auf der Baustelle. Beide müssen dem Hersteller des Betons vom Bauausführenden so vorgegeben werden, dass der Beton in der zur Verfügung stehenden Zeit gefördert, verteilt und vollständig verdichtet werden kann. Die Klasseneinteilung für die sieben verschiedenen *Konsistenzbereiche* der E DIN 1045-2 sind in **Tafel II.3.2-1** zusammengefasst.

Die *Konsistenzklassen*, die den verschiedenen Prüfverfahren zugeordnet sind, können nur teilweise den Konsistenzbereichen zugeordnet werden. Für die so genannte *„Grünstandfestigkeit"*, eine sehr steife Konsistenzeinstellung und wichtige Eigenschaft bei der Betonwarenherstellung mit sofortiger Entformung, gibt es in E DIN 1045-2 keine brauchbare Unterteilung im Konsistenzbereich C0 und keine durch Prüfverfahren definierte Konsistenzklasse, weil diese Eigenschaft nur bauteilbezogen definiert werden kann (s. Abschnitt II.11.1). „Steife" bis „plastische" Konsistenzen werden z. B. im Straßenbau verwendet. Für bewehrte Bauteile auf Baustellen werden in der Regel alle Konsistenzen von „plastisch" bis „sehr fließfähig" angewendet. Selbstverdichtende Betone weisen eine sehr fließfähige Konsistenz auf, die dadurch gekennzeichnet ist, dass sich der Beton ohne Schlag auf dem Ausbreittisch auf mehr als 65 cm Durchmesser ausbreitet (s. Abschnitt II.4.6).

Tafel II.3.2-1: Konsistenzbereiche und Konsistenzklassen nach E DIN 1045-2

Konsistenzbereiche	Konsistenzklassen*)			
	Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß	Setzzeit (Vébé)	Setzmaß (Slump)
sehr steif	C0	–	V0 bis V4	S1 bis S5
steif	C1	F1		
plastisch	C2	F2		
weich	C3	F3		
sehr weich	–	F4		
fließfähig	–	F5		
sehr fließfähig	–	F6	–	–

*) Die verschiedenen Konsistenzklassen sind nicht direkt aufeinander beziehbar [Bon2]

Tafel II:3.2-2: Einflussgrößen zur Steuerung der Frischbetonkonsistenz

Bestandteil	Einflussgröße
Leim (Mehlkornsuspension)	rheologische Eigenschaften in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung
	Volumenanteil
Zuschlag	Art (rund, gebrochen, Rohdichte)
	Kornaufbau (Sieblinie)

Steuerbar ist die Konsistenz des Frischbetons im Wesentlichen durch die rheologischen Eigenschaften und den Volumenanteil des Leims (Mehlkornsuspension) sowie durch Art und Kornauf-

13 Betonbauwerke mit Anforderungen an die Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen

13.1 Anwendungsbereich

Die *Dichtheit* von Betonbauwerken gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ermöglicht ohne zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen die Herstellung einschaliger Konstruktionen, bei denen der Beton die tragende und die abdichtende Funktion zugleich übernimmt. Beispiele aus der großen Fülle derartiger Bauwerke sind:

- Bauwerke im Grundwasser mit nutzbaren Innenräumen *(„Weiße Wannen")*
- Wasserbehälter, einschließlich Trinkwasserbehälter
- Wasserrückhaltebehälter (mit Luftunterdruck)
- Schleusen und Talsperren
- Prüfbunker mit Luftüber- und Luftunterdruck
- Druckrohrleitungen, Wasserkanäle, Tunnel
- Schwimmfähige Konstruktionen wie Pontons, Schiffe, Offshore-Bauwerke
- Umweltschutzbauwerke zur vorübergehenden Aufnahme von umweltgefährdenden Flüssigkeiten jeder Art (Auffangwannen im Industriebereich) und dichte Ableitflächen (Chemielager und Tankstellen) (s. Abschnitt II.13.7).

13.2 Kriterien für die Dichtheit einer Betonkonstruktion

Die Dichtheit von Bauwerken allgemein ergibt sich aus der Erfüllung von drei Anforderungen:

- der Baustoff selbst muss hinreichend dicht sein (s. Abschnitt II.13.3)

- die Bauteile dürfen keine durchlässigen Risse aufweisen (s. Abschnitt II.13.4.)
- alle Bauteilfugen müssen hinreichend dicht sein (s. Abschnitt II.13.5.)

Daraus ergeben sich spezielle Anforderungen an wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (s. Abschnitt II.13.6) und an Betonbauwerke beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (s. Abschnitt II.13.7).

Die Beurteilung der Dichtheit eines Bauwerks oder Bauteils beruht stets auf technischen Kriterien, die sich aus der Forderung nach Gebrauchsfähigkeit ergeben. Hierbei können die Abstufungen für die tolerierbare Durchlässigkeit eines Bauteils gegenüber Flüssigkeiten und Gasen in weiten Grenzen unterschiedlich sein. Die Forderung nach „Null-Molekül-Durchgang" ist weder sinnvoll noch erfüllbar. So kann eine Betonwand den gleichen Wasserdampfdiffusionswiderstand wie eine normgerechte Bitumen- oder Kunststoffdichtungsbahn aufweisen. Keine von beiden ist dicht im Sinne von „Null-Durchgang", aber beide können technisch dicht sein im Sinne der geforderten Gebrauchsfähigkeit eines Bauteils.

13.3 Dichtheit des Baustoffs Beton

Zementstein hat keine so dichte Struktur wie Metall oder Glas (s. Abschnitte I.4.2 und I.5.7). Eine sehr geringe Durchlässigkeit des Zementsteins und damit des Betons gegenüber Flüssigkeiten und Gasen – auch wenn sie sich nur in einer bestimmten Eindringtiefe während der vorgesehenen Beaufschlagungsdauer ausdrückt – ist vorhanden und muss erforderlichenfalls in Rechnung gestellt werden.

Der Stofftransport kann über Diffusion, kapillares Saugen oder als laminare Strömung infolge eines Druckunterschieds erfolgen

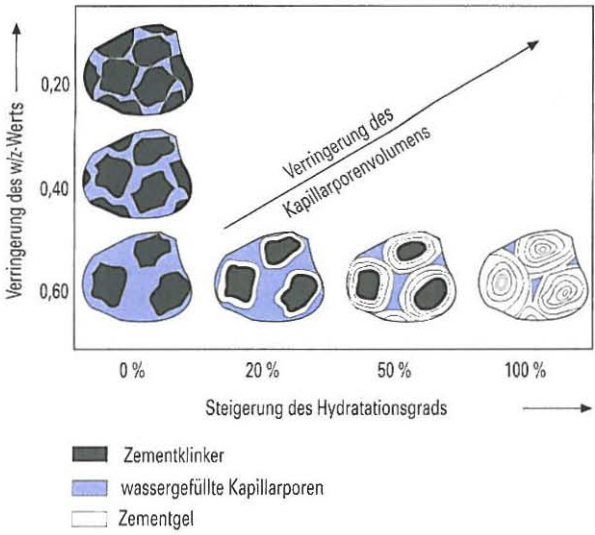


Bild II.13.3-1: Verringerung des Kapillarporenvolumens von Zementstein durch niedrigen Wasserzementwert und hohen Hydratationsgrad

(s. Bild I.5.7-2). Während der Transport durch Diffusion sowohl in den Gelporen als auch in den Kapillarporen erfolgen kann, sind das kapillare Saugen und die laminare Strömung auf den offenen Kapillarporenbereich beschränkt. Deshalb lässt sich die *Durchlässigkeit* des Zementsteins und Betons gegenüber diesen Transportarten durch Erniedrigung des Wasserzementwerts und durch einen hohen Hydratationsgrad auf alle technischen Anforderungen hin anpassen (s. **Bild II.13.3-1** sowie Abschnitte I.4.2 und I.5.7).

Die Durchlässigkeit von lufttrockenem Beton mit dichtem natürlichem Zuschlag gegenüber Sauerstoffgas wurde an verschiedenen Stellen untersucht [Grä1, Grä3, Law2]. Dabei ergab sich der im **Bild II.13.3-2** dargestellte Zusammenhang zwischen dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K in 10^{-16} m² und dem spezifischen Diffusionskoeffizienten D in 10^{-8} m² · s^{-1}. Die Prüfkörper mit Durchmesser d = 150 mm und Höhe h = 50 mm wurden 28 Tage konserviert nachbehandelt und nach einer 56 Tage bis 1,5 Jahre dauernden Lagerung bei 20 °C/65% rel. F. geprüft. Als Anhaltswert sind Bereiche für verschiedene Wasserzementwerte eingetragen. Auf diese Weise lässt sich die „offene" Porosität von trockenem Beton charakterisieren. Sie ist verständlicherweise stark vom Füllungsgrad der Kapillarporen mit Wasser, d. h. vom Feuchtegehalt des Betons abhängig.

Da es bisher nicht gelungen ist, eine Schnelltrocknung einzuführen, die zu vergleichbaren Durchlässigkeiten führt wie eine längerfristige Trocknung im Klimaraum, müssen die Prüfbedingungen stets mit angegeben werden [Bun1].

Der spezifische Permeabilitätskoeffizient K in m² für Gase lässt sich für Flüssigkeiten, die die Kapillarstruktur des Zementsteins nicht verändern, in den Durchlässigkeitsbeiwert k in m · s^{-1} nach Darcy für inkompressible Flüssigkeiten umrechnen [Grä1].

$$k = K \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \qquad \text{[Gl.II.13.3-1]}$$

ρ_w Dichte der Flüssigkeit (Wasser) in kg/m³ = N · s² · m^{-4}
g Erdbeschleunigung = 9,81 m · s^{-2}
η Viskosität der Flüssigkeit in N · s · m^{-2}

Dies gilt jedoch für Wasser allenfalls kurzfristig, weil ständige Wasserbelastung abdichtende Wirkung hat [Bon4]. Die Selbstabdichtung lässt sich mit fortschreitender Hydratation, einem Quellen des Zementgels, Carbonatbildung sowie mit Verstop-

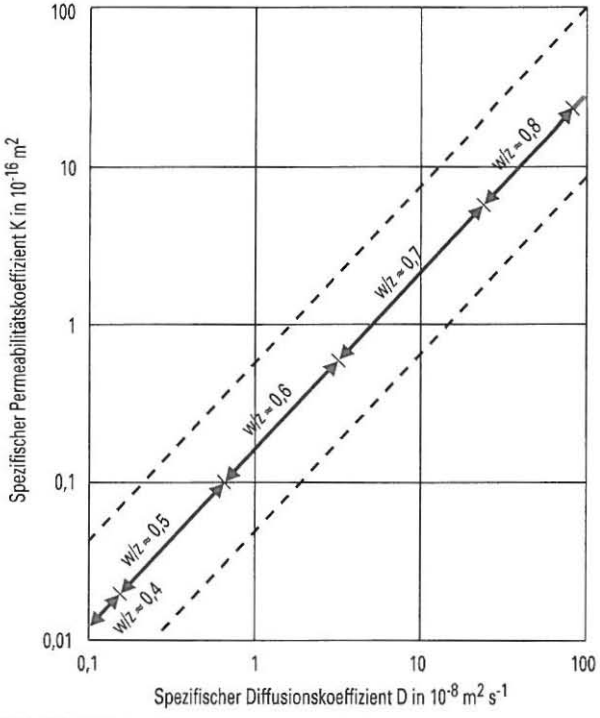


Bild II.13.3-2: Zusammenhang zwischen spezifischem Permeabilitätskoeffizienten und spezifischem Diffusionskoeffizienten für trockenen Beton sowie Anhaltswerte für Wasserzementwerte entsprechender Betone (Prüfgas: Sauerstoff)

fungseffekten an Engpässen des Kapillarporensystems begründen. Diese Effekte können langfristig zur vollständigen *Selbstabdichtung* von Rissen mit Breiten $w \leq 0{,}2$ mm [Edv1] führen.

Aus den gleichen Effekten ergibt sich bei langfristiger Wasserbelastung der Zementsteinstruktur eine Abnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts k gegenüber dem lufttrockenen Zustand um einen Faktor von rd. 10^{-3} m · s^{-1} und mehr [Grä1]. Das Phänomen der fortschreitenden Selbstabdichtung von Zementstein unter der Einwirkung von drückendem Wasser kann kaum überschätzt werden, solange durch einen niedrigen Wasserzementwert, z. B. $w/z < 0{,}50$, und reaktive Zusatzstoffe noch Reaktionsreserven vorhanden sind. In einem ersten Ansatz können die Durchlässigkeitsbeiwerte für den Zementstein gemäß Bild I.5.7-3 im Kurzzeitversuch auch für Beton zugrunde gelegt werden. Sie können wegen des Umwegeffekts, hervorgerufen durch dichte Zuschlagkörner, sogar kleiner ausfallen. Ein zu niedriger Mehlkorngehalt im Beton kann andererseits zum Absetzen von Wasser und zu schlechtem Verbund mit dem Zuschlag führen, wodurch die Wasserdurchlässigkeit des Betons erhöht werden kann. Der zuletzt genannte Einfluss kann sich besonders bei Beton mit hohen Wasserzementwerten ($w/z > 0{,}60$) und sehr weicher Konsistenz (> F3) nachteilig auswirken.

Der Nachweis der *Wasserundurchlässigkeit* erfolgt durch Messung der Wassereindringtiefe e gemäß DIN 1048-5 (s. **Bild II.13.3-3**). Das Eindringen organischer Flüssigkeiten wird mit dem in Abschnitt II.13.7 angegebenen Verfahren ermittelt.

13.4 Begrenzung der Rissbreiten

Aus Abschnitt II.13.3 ergibt sich, dass eine Begrenzung der Rissbreiten durch Bewehrung bei allen Betonbauwerken erforderlich ist, bei denen die Zugdehnungen (Zugspannungen)

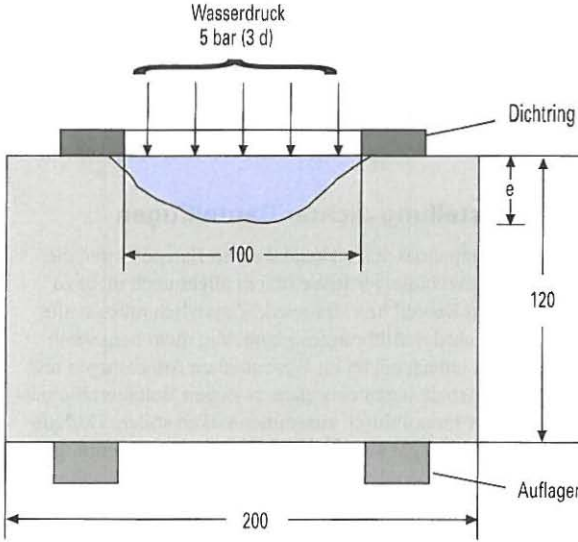


Bild II.13.3-3: Wasserundurchlässigkeitsprüfung an Platten 200 mm × 200 mm × 120 mm gemäß DIN 1048-5

größer als die Zugbruchdehnung (Zugfestigkeit) werden können (s. Abschnitte II.5 und II.6). Je feiner die Bewehrung aufgeteilt wird, umso geringer wird bei gleicher Beanspruchung die Rissbreite. Durch konstruktive, betontechnische und ausführungstechnische Maßnahmen lässt sich die Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung wesentlich vermindern [Thi4, Gru1, Loh2]. Das gilt insbesondere für Zwangbeanspruchungen in Bauteilen, deren Verformung infolge Abfließens der Hydratationswärme oder Schwindens durch bereits bestehende Bauteile oder durch den

Boden behindert wird, z. B. „Bodenplatte-Wand-Problem" (s. Abschnitt II.6). Treten durchlässige Risse in einem Bauteil auf, so können sie in einschaligen Betonbauwerken jederzeit zuverlässig durch Injektion abgedichtet werden (s. Abschnitt II.15). Wenn diese Risse schon im Bauzustand auftreten, was meist der Fall ist, lassen sie sich ggf. auch an der Oberfläche abdichten.

13.5 Herstellung dichter Bauteilfugen

Die Herstellung eines ausreichend dichten Baustoffs und die Vermeidung durchlässiger Risse führen allein noch nicht zu einem dichten Bauteil bzw. Bauwerk. Zusätzlich müssen alle *Fugen* und Rohrdurchführungen planmäßig dicht hergestellt werden. Man unterscheidet im Wesentlichen Arbeitsfugen und Dehnfugen. Arbeitsfugen entstehen zwischen Betonierabschnitten, die später monolithisch zusammenwirken sollen. Deshalb haben sie in der Regel auch eine durchlaufende Bewehrung, z. B. zwischen Bodenplatte und Wand. Auch Rohrdurchführungen sind „Arbeitsfugen". Es gibt zahlreiche Abdichtungsmöglichkeiten für Arbeitsfugen [Gru1, Loh2, Me25, Me24, Me32]:

- Aufrauen des vorhandenen Betons und „dicht" anbetonieren
- Einlegen eines Injektionsschlauches in die Fuge, über den nach dem Erhärten des „Gegenbetons" Reaktionsharz oder Zementsuspension injiziert wird
- Einlegen eines „Quellbands"
- beiderseitiges Einbetonieren eines „außenliegenden" oder „innenliegenden" Fugenbands gemäß DIN 18197 usw.
- Einbau von Fugenblechen (einfacher Bandstahl gemäß DIN EN 18131 oder DIN 59220)

Die Verfahren können nicht als gleichwertig betrachtet werden. Als sehr robuste, sehr sichere und sehr preiswerte Lösung zur *Abdichtung* von Arbeitsfugen hat sich die Verwendung von

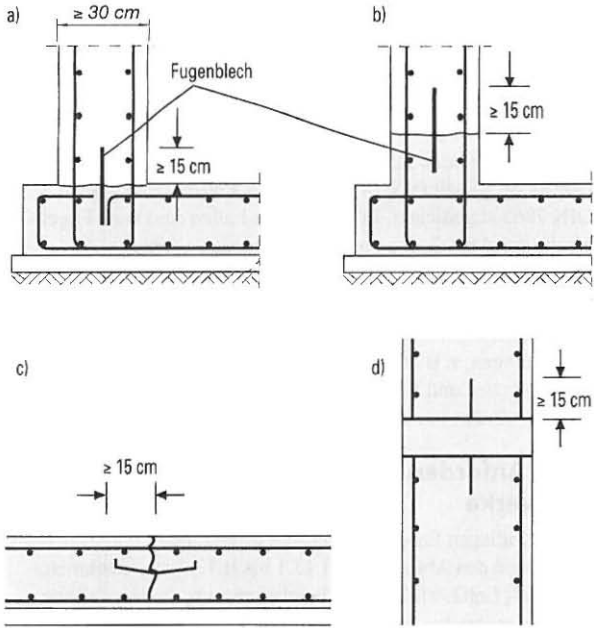


Bild II.13.5-1: Beispiele für die Abdichtung von Arbeitsfugen an flüssigkeitsdichten Bauteilen mit Fugenblechen a) und b) Bodenplatte/Wand, c) Bodenplatte, d) Rohrdurchführung (Blech-Manschette)

Fugenblechen erwiesen [Gru1] (s. **Bild II.13.5-1**). Die Bleche werden durch Schweißen, Kleben oder Klemmen untereinander verbunden (keine Überlappung mit Spalt!). Die Querschnitte der Bleche für Arbeitsfugen betragen i. d. R. 1,5 × 300 mm².

Die Anwendung von Fugenbändern und die Bemessung bei drückendem Wasser sind in DIN 18197 geregelt. Auf der Baustelle dürfen nur gerade Stumpfschweißungen mit passendem Gerät ausgeführt werden (ein einfaches Heizschwert für Thermoplaste genügt nicht!).

Dehnfugen werden in der Regel mit Fugenbändern aus Thermoplasten gemäß DIN 18541 oder aus Elastomeren gemäß DIN 7865 abgedichtet. In besonderen Fällen sind auch Fugenbleche zur Abdichtung von Dehnfugen verwendbar (s. Abschnitt II.13.7.2).

Wichtigste Voraussetzung dafür, dass die Fugenabdichtung auf der Baustelle gelingt, ist eine konsequente Planung. Die Fugenabdichtungen, z. B. hinsichtlich ihrer Lage und Befestigung von Fugenblechen und Fugenbändern, müssen genauso sorgfältig geplant werden wie die Bewehrung.

13.6 Anforderungen an wasserundurchlässige Bauwerke

Die Grundlagen für die Herstellung wasserundurchlässiger Bauwerke sind den Abschnitten II.13.1 bis II.13.5 zu entnehmen (s. [Gru1, Loh2, Me25]). Sie beinhalten stets die Herstellung eines wasserundurchlässigen Betons, die Vermeidung bzw. Abdichtung wasserdurchlässiger Risse und die Herstellung dichter Bauwerksfugen. Vonseiten der Normung wird in E DIN 1045-2 lediglich ein Wasserzementwert von $w/z \leq 0{,}60$ verlangt. Bezüglich der Betonzusammensetzung gilt i. d. R. Expositionsklasse XC4 (s. Tafeln II.7.2-1 und IV.3-3). Der Nachweis der Wassereindringtiefe wird in E DIN 1045-2 nicht mehr gefordert.

Die Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite wird nach E DIN 1045-1 ermittelt. In vielen bewährten Konstruktionen wurde die rechnerische Rissbreite auf $w \leq 0{,}20$ mm beschränkt.

Es ist beabsichtigt, Konstruktions- und Ausführungsregeln für wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton im Rahmen einer DAfStb-Richtlinie zu erarbeiten. Während sich planmäßig genutzte unterirdische Räume wie Tiefgaragen, Museumsmagazine, Telefonzentralen usw., die als einschalige Betonkonstruktionen ohne zusätzliche Abdichtung oft mehrere Meter in drückendem Grundwasser stehen, problemlos verhalten, wird bei der Nutzung von Kellerräumen als Wohnraum gelegentlich berichtet, dass die Dichtheit der einschaligen Betonkonstruktion ohne zusätzliche Abdichtung nicht ausreiche. Abgesehen davon, dass bei vielen Privathäusern der Stand der Technik bei der Planung und Ausführung aus Unkenntnis oft nicht beachtet wird, ($w/z \leq 0{,}60$, besser $w/z = 0{,}50$, Rissbreitenbeschränkung durch Bewehrung, Abdichtung der Arbeitsfugen durch Bleche, Rohrdurchführungen mit Dichtmanschetten (s. Abschnitt II.13.1 bis 5), wird oft vergessen, dass bewohnte Kellerräume einer (außen liegenden) Wärmedämmung, Temperierung und ausreichenden Belüftung bedürfen. Hier gelten die gleichen bauphysikalischen Regeln wie für die Vermeidung von Kältebrücken in hochliegenden Räumen. Wassermengen, die kapillar und infolge Dampfdiffusion durch eine sachgerecht hergestellte Betonwand transportiert werden können (s. **Bild II.13.6-1**), sind so gering [Bed1], dass sie jederzeit von der Raumluft aufgenommen werden, siehe auch das Berechnungsbeispiel in [Loh2] mit 1 g bis 2 g/($m^2 \cdot d$).

13.7 Betonbau beim Umgang mit umweltgefährdenden Stoffen

13.7.1 Regelungen für die Bauweise

Gemäß dem Wasserhaushaltsgesetz § 19g müssen Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen, Behandeln und Verwenden von

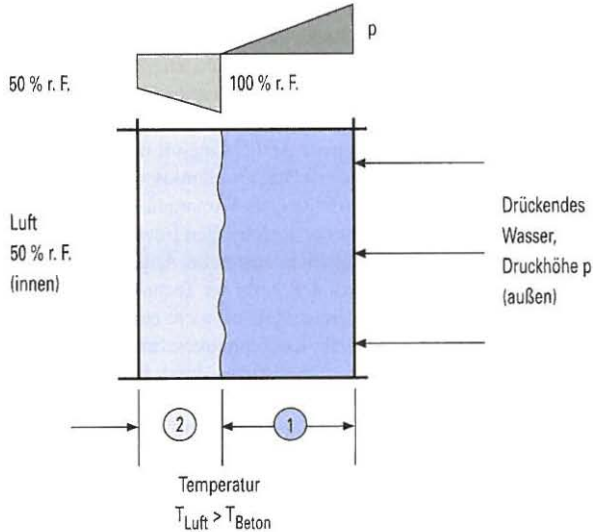


Bild II.13.6-1: Vereinfachte Darstellung des Wassertransports in einer Betonwand, die von der einen Seite mit Druckwasser beaufschlagt und von der anderen Seite belüftet wird

wassergefährdenden Stoffen so eingebaut, aufgestellt und betrieben werden, dass eine Verunreinigung der Gewässer nicht zu befürchten ist.

Zur Erfüllung dieses gesetzlichen Rahmens dienen Landeswassergesetze, Verwaltungsvorschriften, Verordnungen und Richtlinien. Auf Basis der Muster-VAwS wurde vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton die Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen", DAfStb-Richtlinie BUmwS [Ri2], erarbeitet.

Die Richtlinie regelt, welche baulichen Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit einschalige Betonbauten gemäß E DIN 1045 ohne Oberflächenabdichtung beim Umgang mit flüssigen (einschließlich verflüssigter Gase) oder pastösen, wassergefährdenden Stoffen nach § 19g WHG dem Besorgnisgrundsatz des Wasserhaushaltsgesetzes genügen.

Die Betonbauten nach dieser Richtlinie müssen bei den zu erwartenden Einwirkungen unter Berücksichtigung der infrastrukturellen Gegebenheiten für eine jeweils definierte Dauer dicht sein. Mit Hilfe dieser Richtlinie können Bauwerke mit einmaliger und intermittierender Beaufschlagung entworfen und bemessen werden.

Anders als wasserundurchlässige Bauwerke sind die umweltschützenden Bauwerke aus Beton umfassend geregelt.

13.7.2 Einzelregelungen der DAfStb-Richtlinie BUmwS [Ri2]

Die Richtlinie umfasst folgende Teile:

Teil 1: Grundlagen und Bemessung unbeschichteter Betonbauten
Teil 2: Baustoffe und Einwirken von Flüssigkeiten
Teil 3: Konstruktion und Bauausführung
Teil 4: Prüfverfahren
Teil 5: Instandsetzung und Ertüchtigung
Teil 6: Überwachung und Konzept für den Beaufschlagungsfall

Grundlagen und Bemessung (Teil 1)

Der Bemessung bezüglich Dichtheit liegt ein Sicherheitskonzept zugrunde, dessen Versagenswahrscheinlichkeit dem der Tragfähigkeitsbemessung von Bauwerken entspricht. Die so bemessenen Auffangbehälter und Ableitflächen sind dicht, wenn die aufgefangene Flüssigkeit innerhalb der Entsorgungszeit t, in der Regel t = 72 h, die andere Seite des Bauteils nicht erreicht.

Dies gilt für ungerissene Bauteile, für gerissene Bauteile mit ungerissener Druckzone sowie für Bauteile mit durchgehenden Rissen. Bemessungsgrundlage ist die charakteristische Eindringtiefe e_{tk} der Flüssigkeit für die Beaufschlagungsdauer t, in der Regel 72h, → e_{72k} (**Bild II.13.7-1**). Der Rechenwert e_{tk} ergibt sich aus dem mittleren Prüfwert der Eindringtiefe e_{tm} dreier Probekörper zu $e_{tk} = 1{,}35\ e_{tm}$.

Baustoffe (Teil 2)

An den *„Flüssigkeitsdichten Beton"* (FD-Beton) (s. Abschnitt II.13.7.3) werden Anforderungen bezüglich seiner Zusammensetzung gestellt, sodass die Eindringtiefe einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von ihrer dynamischen Viskosität und ihrer Oberflächenspannung σ aus einem Diagramm abgelesen werden kann (**Bild II.13.7-2**). Darüber hinaus können auch dichtere Betone durch gesonderte Eignungsprüfungen (FDE-Betone) entwickelt und eingesetzt werden (s. Abschnitt II.13.7.3).

Konstruktion (Teil 3)

Hier werden Angaben zur Mindestbewehrung für eine Rissbreitenbeschränkung auf $w_{cal} = 0{,}2$ mm gemacht. Kleinere rechnerische Rissbreiten als 0,1 mm dürfen beim Rissbreitennachweis nicht in Ansatz gebracht werden. Sollten sichtbare Risse auftreten, so sind diese durch Injektion zu schließen. Insbesondere

● Dichtheit

$$e_{tk} \cdot \gamma_e \leq x$$

e_{tk} = char. Eindringtiefe
γ_e = Sicherheitsbeiwert
x = Druckzonendicke

● chemische Widerstandsfähigkeit
s_{Ctk} = Schädigungstiefe

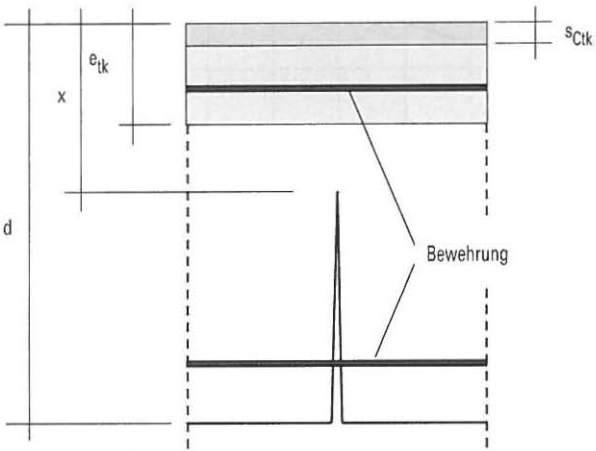


Bild II.13.7-1: Nachweis der Dichtheit der Druckzone

sind in diesem Abschnitt die verschiedenen Arten der Abdichtung von Arbeits- und Dehnungsfugen beschrieben (s. Bild II.13.5-1). Mit einer zusätzlichen Sicke in Fugenmitte werden Fugenbleche aus Edelstahl gemäß Bild II.13.5-1c) auch für Bewegungsfugen mit geringer Fugenbewegung verwendet. Sie haben den Vorteil, von organischen Stoffen nicht angegriffen zu werden.

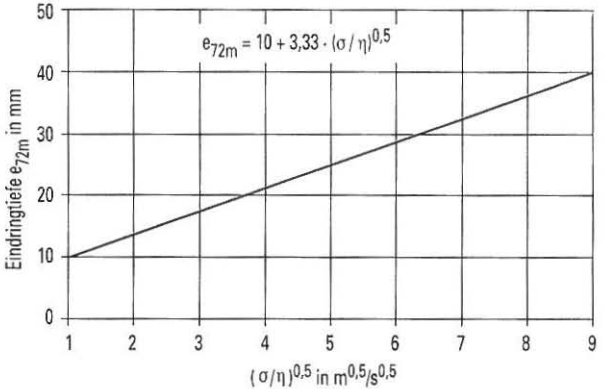


Bild II.13.7-2: Eindringtiefe e_{72m} organischer Flüssigkeiten in FD-Beton in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität η und der Oberflächenspannung σ

Prüfverfahren (Teil 4)

Die Prüfverfahren umfassen z. B. Prüfungen der Eindringtiefe von Flüssigkeiten in Beton, der Dampfdiffusion, des Säurewiderstands, des Eindringens von Flüssigkeiten in Risse, der Beständigkeit von Fugenbändern sowie der Dichtheitsprüfung von Fugen.

Instandsetzung (Teil 5)

Als Instandsetzungsmaßmahmen werden z. B. das Auftragen einer neuen Dichtfläche, die Instandsetzung der Bewehrung sowie die Injektion von Rissen beschrieben. Grundlage für die Ausführung dieser Arbeiten ist die DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen" [Ri9, Ri10, Ri11].

Überwachung (Teil 6)

Bauwerke nach der DAfStb-Richtlinie BUmwS [Ri2] bedürfen einer besonders sorgfältigen Planung und Überwachung. Qualitätssichernde Maßnahmen sind während der Bauausführung, Dichtheitsprüfungen bei der Übergabe und während des Betriebs durchzuführen. Ein Konzept für den Beaufschlagungsfall, z. B. bezüglich Alarmzeit, Art und Dauer der Entsorgung, und Nachsorge für das Bauwerk gehören bereits zur Planung des Bauwerks.

13.7.3 Herstellung und Prüfung besonders dichter Betone

Die DAfStb-Richtlinie BUmwS stellt an „Flüssigkeitsdichten Beton" (FD-Beton) folgende Anforderungen:

- Herstellung und Verarbeitung mit Eigen- und Fremdüberwachung
- Dichter Zuschlag, Größtkorn 16 oder 32 mm, Sieblinie A/B
- Wasserzementwert $0{,}50 \geq w/z \geq 0{,}45$
- Zementleimgehalt ≤ 290 l/m³
  (z. B. 340 kg/m³ Zement, 165 l/m³ Wasser)
- Verwendung von Restwasser nach der DAfStb-Rili [Ri5] erlaubt
- Konsistenz KR ohne Entmischungsneigung
- Anrechnung von Flugasche auf den w/z-Wert erlaubt, s. „äquivalenter Wasserzementwert".

Die Eindringtiefe organischer Flüssigkeiten e_{72m} in FD-Beton wurde umfassend untersucht und ist in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung σ ($mN \cdot m^{-1}$) und der dynamischen Viskosität η ($mN \cdot s \cdot m^{-2}$) der Flüssigkeit aus Bild II.13.7-2 direkt zu entnehmen. Damit können aufwendige Eindringprüfungen i. A. entfallen.

Um der Entwicklung freien Raum zu geben, wurde den Betonherstellern die Möglichkeit gegeben, gleich dichte Betone mit

einer größeren Stoffauswahl oder wesentlich dichtere Betone als FD-Beton zu entwickeln. Diese gehören dann zu den „Flüssigkeitsdichten Betonen nach Eindringprüfung" (FDE-Betone). Es handelt sich wahlweise um Betone

- mit Zementen CEM II/B-P,
- mit Wasserzementwert w/z < 0,45,
- mit Zuschlag gemäß DIN 4226 und Größtkorn 8 mm ≤ d_g ≤ 16 mm,
- mit porigem Zuschlag gemäß DIN 4226 Teil 2 (z. B. Leichtbeton nach DIN 4219),
- mit höherem Leimgehalt als 290 l/m³,
- unter Anrechnung von anderen mineralischen Zusatzstoffen als Flugasche auf den Mindestzementgehalt nach E DIN 1045-2,
- nach DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton [Ri6],
- unter Verwendung von Kunststoffzusätzen, so weit ihre Anwendung für Beton nach E DIN 1045-2 zugelassen ist,
- unter Verwendung von Fasern, so weit ihre Anwendung für Beton nach E DIN 1045-2 zulässig ist.

Die Prüfung der Eindringtiefe erfolgt i. d. R. an einem in der Mantelfläche abgedichteten Bohrkern (**Bild II.13.7-3**). Die Eindringtiefe wird am aufgespaltenen Bohrkern ermittelt. Die Kontrolle erfolgt über das eingedrungene Volumen, sofern der Porenraum bekannt ist.

Besonders wirkungsvoll lässt sich das Eindringen organischer Flüssigkeiten dadurch vermindern, dass man quellfähige oder sich lösende Kunststoffzusätze verwendet, die das Eindringen zunehmend hemmen (**Bild II.13.7-4**). Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen Eindringmenge und Porosität bzw. Druckfestigkeit entkoppeln (**Bild II.13.7-5**).

Die Schädigungstiefe s_{Ctm}, infolge Säureeinwirkung (s. Bild II.13.7-1), hat sich innerhalb 72 Stunden als so gering erwiesen,

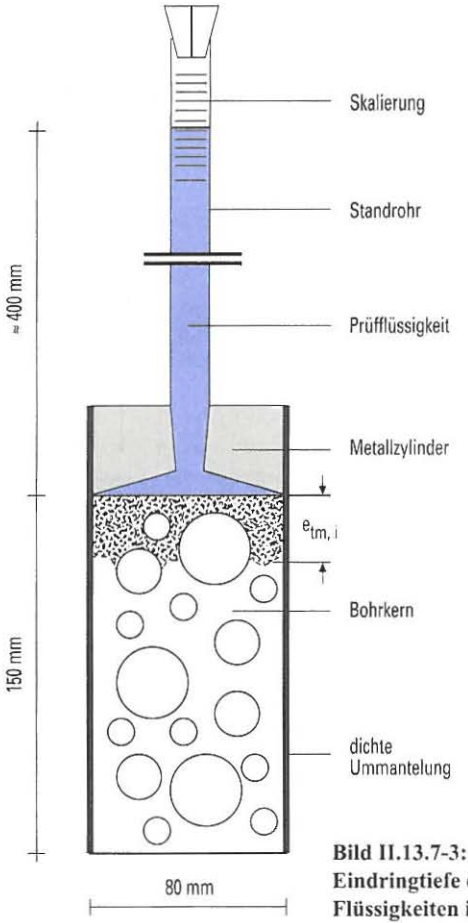


Bild II.13.7-3: Prüfung der Eindringtiefe organischer Flüssigkeiten in Beton

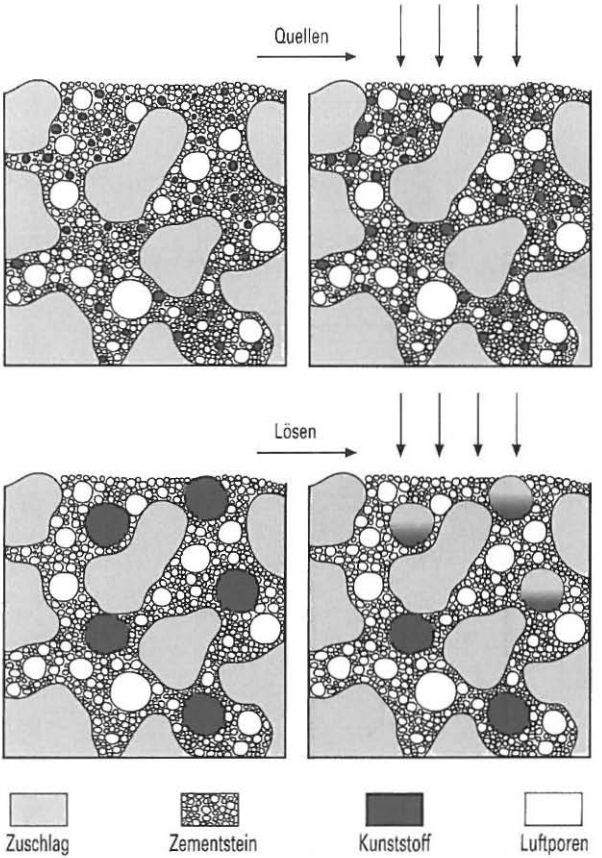


Bild II.13.7-4: „Innere Abdichtung" von Beton durch Kunststoffe

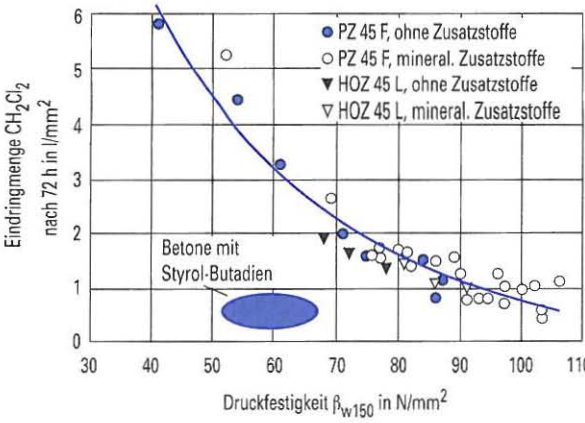


Bild II.13.7-5: Abhängigkeit der Eindringmenge Methylenchlorid in Beton von der Druckfestigkeit. Entkopplung durch quellenden Kunststoffzusatz Styrol-Butadien

dass für FD-Beton und beliebige Säureeinwirkung $s_{C72m} = 5$ mm in die Bemessung eingesetzt werden darf. Damit wird deutlich, dass die Bewehrung innerhalb dieser Zeit nicht erreicht wird, eine säurefeste Beschichtung überflüssig ist und der Auffangbehälter nach dem Angriff leicht für die weitere Verwendung wieder hergerichtet werden kann.

14 Mörtel für spezifische Anwendungsbereiche und Estrich

14.1 Mörtelarten und Definitionen

Mineralisch gebundene *Mörtel* bestehen aus Bindemittel, Zuschlag und Zugabewasser sowie ggf. Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Zu den wichtigsten *Bindemitteln* für Mörtel gehören Zement (s. Abschnitte I. und II.2.1) sowie Kalk und Gips in den verschiedensten Kombinationen. Organische Bindemittel, z. B. Reaktionsharze, werden u. a. für Instandsetzungsmörtel im Betonbau verwendet (s. Abschnitt II.15). Da die meisten Mörtel von Hand verarbeitet werden, müssen sie aus Gründen des Arbeitsschutzes chromatarm sein (s. Abschnitt I.3.4.2). Dafür werden alle Sackzemente und alle werkmäßig hergestellten Mörtel chromatarm nach TRGS 613 hergestellt.

Das *Zugabewasser* bildet mit dem entsprechenden Bindemittel und den weiteren mehlfeinen Bestandteilen den „Leim", der dem Mörtel die geforderte Verarbeitbarkeit (Konsistenz) und nach dem Erhärten das festigkeitsbildende Gefüge und den Verbund mit anderen Bauteilen verleiht. *Mörtelzuschlag* kann aus anorganischen oder organischen Stoffen bestehen, z. B. Quarzsand oder Polystyrol. Er kann direkt aus natürlichen Vorkommen oder künstlich hergestellt werden, z. B. Brechsand oder Blähtonsand. Der Zuschlag für Mörtel wird i. d. R. so aufbereitet, dass er vorgegebenen Sieblinien entspricht. Das Größtkorn ist i. d. R. ≤ 4 mm.

Zusatzstoffe und *Zusatzmittel* (s. Abschnitte II.2.2 und II.2.4), werden gezielt zur Steuerung bestimmter Eigenschaften zugegeben. Anorganische Farbpigmente sind z. B. Zusatzstoffe, die

eine besonders dauerhafte Farbgebung ermöglichen. Luftporenbildner (LP) oder Dichtungsmittel (DM) dienen als Zusatzmittel, z. B. zur Steuerung der Rohdichte und der Wärmedämmeigenschaften (LP) oder zur Wasserabweisung / Hydrophobierung (DM).

Die Variationsmöglichkeiten der Zusammensetzung und die Anwendungsbreite der Mörtel sind eher noch größer als bei Beton, weil das Festigkeitskriterium bei Mörteln nicht immer so dominant ist. Dementsprechend führen die Herstell- und Verarbeitungsbedingungen, die Verwendung und die spezifischen Anforderungen im Verbund mit anderen Baustoffen zu jeweils neuen Zusammensetzungen. Die nachstehende **Tafel II.14.1-1** gibt einen kleinen Überblick über bekannte Mörtelbezeichnungen.

Mörtel müssen wie Beton unter Beachtung der geltenden Normanforderungen und ggf. weitergehender Erfahrungen zusammengesetzt werden. Durch eine Erstprüfung ist die Erfüllung der Anforderungen vor der Anwendung nachzuweisen, sofern keine Zusammensetzung nach Norm gewählt wird. Wenn entsprechende Anforderungen bestehen, ist auch während der Herstellung und der Verarbeitung die Einhaltung der erforderlichen Eigenschaften durch Übereinstimmungsnachweise zu bestätigen. Mörtel, die von den Normanforderungen abweichen, benötigen in einigen Fällen eine bauaufsichtliche Zulassung.

Mörtel werden heute meist mit Rührgeräten oder Mischern hergestellt. Wird ein Mörtel vor Ort auf der Baustelle verarbeitungsgerecht angemischt, nennt man ihn *Baustellenmörtel*. Für größere Mörtelmengen ist die werkmäßige Herstellung weit verbreitet. Mörtel, der als Sackware oder Siloware auf der Baustelle verfügbar ist, wird als *Werk-Trockenmörtel* bezeichnet. Er wird nach einer Mischanweisung (Rezeptur) werkseitig aus getrockneten Zuschlägen, Bindemitteln und Zusätzen hergestellt. Die vom Hersteller angegebene Zugabewassermenge muss vom Ver-

Tafel II.14.1-1: Beispiele für Mörtelbezeichnungen

Beurteilungskriterien	Bezeichnung
Anwendungsbereich	Mauermörtel, Putzmörtel, Fugenmörtel, Fliesenkleber, Dünnbettmörtel, Estrich(mörtel), Auskleidungsmörtel (z. B. für Trinkwasserrohre)
Verarbeitungsart	Spritzmörtel, Spachtelmörtel, Einpressmörtel
Konsistenz	erdfeucht, plastisch, fließfähig
Zusammensetzung	Zementmörtel, Kalkzementmörtel
Herstellart	Baustellenmörtel, Werk-Frischmörtel, Werk-Trockenmörtel
physikalische Eigenschaften	Normalmörtel, Leichtmörtel, Wärmedämmmörtel bzw. -putz

arbeiter eingehalten werden. Wenn die Anmachflüssigkeit nicht nur aus Wasser besteht, kann sie als zweite Komponente im Doppelgebinde mitgeliefert werden, z. B. Anmachflüssigkeit mit Kunststoffdispersion für bestimmte Instandsetzungsmörtel (s. Abschnitt II.15).

Werk-Frischmörtel werden in verarbeitungsgerechter Form, z. B. im Fahrmischer vom Herstellwerk auf die Baustelle geliefert. Der Mörtel ist meist verzögert und kann längere Zeit verarbeitet werden, z. B. bis zu 36 Stunden.

Werk-Vormörtel besteht aus einem Gemisch von Sandzusätzen, Luft- und Wasserkalk und wird auf der Baustelle durch Zugabe von z. B. Zement und Wasser fertiggemischt. Für die werk-

mäßige Herstellung von Mauer- und Putzmörteln sowie deren Überwachung und Lieferung gilt DIN 18557. Für die Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln für Mauerwerk, Putz und Estrich gilt DIN 18555.

Die Verarbeitbarkeit von Mörteln muss z. B. auf Konsistenz, vorgesehene Verarbeitungsleistung und die erwarteten Eigenschaften des Mörtels abgestimmt sein. Die Verarbeitung reicht vom einfachen Handauftrag mit Spachtel oder Kelle bis zur Dichtstromförderung eines pumpfähigen Mörtels im Druckschlauch. Im Folgenden werden einige zementgebundene Mörtel näher dargestellt, wobei viele Begriffe auch auf anders zusammengesetzte Mörtel übertragen werden können.

14.2 Mauermörtel

Mauermörtel dient zur Herstellung eines dichten und kraftschlüssigen Verbunds zwischen Mauersteinen und zum Ausgleich der schwankenden Steinabmessungen. Die horizontalen Fugen heißen Lagerfugen, die vertikalen Fugen heißen Stoßfugen.

Mauermörtel weist i. d. R. geringere Festigkeiten auf als der Stein, um die Verformungsfähigkeit eines Mauerwerks ohne Rissbildung zu fördern. Man unterscheidet je nach Anwendungsgebiet *Normalmörtel, Leichtmörtel* und *Dünnbettmörtel.* Die Anforderungen an alle drei Mörtelarten sind in DIN 1053 enthalten.

Bei *Normalmörtel* werden die Mörtelgruppen I, II, IIa, III und IIIa unterschieden (s. **Tafel II.14.2-1**). Am häufigsten wird die Mörtelgruppe IIa eingesetzt. Sie enthält i. d. R. hydraulische Bindemittel (hochhydraulischer Kalk, Putz- und Mauerbinder, Zement) und Sand bis 2 mm Größtkorn im Gewichtsverhältnis von rd. 1:3. Die Ermittlung einer geeigneten Zusammensetzung

Tafel II.14.2-1: Mauermörtelgruppen, Bindemittel, Mindestdruckfestigkeiten und Mindesthaftscherfestigkeiten (KT (Kalkteig), KH (Kalkhydrat), HK (Hydraulischer Kalk), PM (Putz- und Mauerbinder), Z (Zement))

Mauermörtelgruppe MG	Art der Bindemittel	Mindestdruckfestigkeit (28 d, Mittelwert)		Mindesthaftscherfestigkeit (28 d, Mittelwert)
		Erstprüfung in N/mm²	Konformitätsprüfung in N/mm²	Erstprüfung in N/mm²
I	KT, KH, HK, PM	keine Anforderung		keine Anforderung
II	KT, KH, HK, PM, Z	3,5	2,5	0,10
IIa	KH, HK, PM, Z	7	5	0,20
III	Z	14	10	0,25
IIIa	Z	25	20	0,30

erfolgt nach Normrezept, i. d. R. jedoch durch eine Erstprüfung. Die Mitverwendung von Flugasche ist bei Werk-Frischmörteln üblich. Tafel II.14.2-1 zeigt die fünf Mörtelgruppen, die dafür normgemäß vorgesehenen Bindemittel sowie die Festigkeitsanforderungen. Die Haftscherfestigkeit wird nur bei der Erstprüfung an einem saugfähigen Normstein geprüft.

Leichtmörtel und *Dünnbettmörtel* sind stets nach Erstprüfung zusammenzusetzen. Neben Druckfestigkeit und Haftscherfestigkeit müssen Leichtmörtel auch Anforderungen an den Quer- und Längsdehnungsmodul, die Trockenrohdichte und die Wärmeleitfähigkeit erfüllen. Für Dünnbettmörtel ist die Druckfestigkeit auch bei Feuchtlagerung nachzuweisen. Da es sich hier quasi um

einen Kleber für plangeschliffene Steine handelt, werden auch hohe Anforderungen an die Verarbeitbarkeitszeit und die Korrigierbarkeitszeit (Verschiebbarkeit in der Mörtelfuge) gestellt.

Im Bereich von Sicht- und Verblendmauerwerk werden oft *Vormauermörtel* verwendet. Es handelt sich um Normalmörtel, die aufgrund günstiger Sieblinie und guten Wasserrückhaltevermögens nicht nur alle Festigkeits- und Verbundanforderungen bei vollfugiger Vermauerung erfüllen, sondern die sich auch mit dem Fugeisen anschließend optimal glätten lassen. Mit Hilfe spezieller *Fugenmörtel*, die in die vorher rd. 2 cm tief ausgekratzte Fuge eingebracht werden, kann eine entsprechende Fugendichtung auch in einem gesonderten Arbeitsgang („Verfugen") erreicht werden.

14.3 Putzmörtel

Putzmörtel sind flächig auf Wände und Decken aufgetragene Mörtel. Sie bilden nach dem Egalisieren und Erhärten einen fest auf dem jeweiligen Untergrund haftenden Belag. Bei mehrlagigen Putzen müssen auch die einzelnen Lagen (Unterputz, Zwischenputz, Oberputz) dauerhaft aufeinander haften.

Innenputze haben z. B. die Aufgabe, Unebenheiten auszugleichen und damit Rohbaudecken und -wände für das Anstreichen oder Tapezieren vorzubereiten. *Außenputze* sollen z. B. das Mauerwerk vor Schlagregen schützen und können bei entsprechender Zusammensetzung eine erhöhte Wärmedämmung bewirken. Putze in strukturierter Form und/oder mit besonderen Zuschlägen und Einfärbungen im Oberputz dienen auch der Oberflächengestaltung, z. B. „Edelputz".

Putzmörtel müssen je nach Putzart und Putzanwendung die Anforderungen nach DIN 18550 erfüllen. Da bei Innenputzen die Anforderung an die Wasserbeständigkeit i. d. R. nicht besteht,

Tafel II.14.3-1: Putzmörtelgruppen, Bindemittel und Mindestdruckfestigkeiten für Putze gemäß DIN 18550-1 und -2

Putzmörtelgruppen	Art der Bindemittel	Mindestdruckfestigkeit (DIN 18555 Teil 3) in N/mm²
P I a, b	Luftkalke, Wasserkalke, Hydraulische Kalke	keine Anforderung
P I c		1,0
P II	Hochhydraulische Kalke, Putz- und Mauerbinder, Kalk-Zement-Gemische	2,5
P III	Zemente	10
P IV a, b, c	Baugipse ohne und mit Anteilen an Baukalk	2,0
P IV d		keine Anforderung
P V	Anhydritbinder ohne und mit Anteilen an Baukalk	2,0

ist die Auswahl der verwendbaren Bindemittel bei den Putzmörtelgruppen nach DIN 18550 erheblich größer als bei den Mauermörteln (s. **Tafel II.14.3-1**), während die Anforderungen an die Festigkeit geringer sind.

Außenputze müssen witterungsbeständig sein. Deshalb werden hier im Fassadenbereich bevorzugt Putzmörtel der Gruppe P II verwendet. Im Keller- und Sockelbereich mit erhöhten Dichtheitsanforderungen sind Putzmörtel der Gruppe P III (Zementmörtel) üblich. Es ist jedoch in jedem Falle darauf zu achten, dass die Festigkeit der Putze niedriger sein muss als die der Steine und dass sie an der Oberfläche geringer sein soll als im Verbundbereich. Andernfalls können Temperatur- und Feuchtespannungen zu Putzschäden (Rissen, Ablösungen) führen.

Bei der Instandsetzung von Altbauten sind häufig feuchte und salzbelastete Untergründe vorzufinden. Wenn der Salztransport nicht unterbunden werden kann, haben sich Spezialputze, so genannte *Sanierputze* bewährt, die sich durch hohe Porosität, hohe Dampfdurchlässigkeit und hohe Speicherfähigkeit für auskristallisierende Salze auszeichnen. Hochfeste Zementmörtel sind auf solchen Untergründen nicht dauerhaft.

14.4 Auskleidungsmörtel für Trinkwasserrohre

Trinkwasserrohre aus Gussstahl oder Stahl müssen innen und außen vor Korrosion geschützt werden. Außen werden die Rohre i. d. R. durch Kunststoffbeschichtungen vor Korrosion und durch faserverstärkte Zementmörtelumwicklungen vor Beschädigung beim Verlegen geschützt. Für den inneren Korrosionsschutz werden die Rohre aus hygienischen Gründen mit Zementmörtel ausgekleidet (s. Abschnitt II.18.3). Dabei sind DIN 2880 und DIN EN 10298 zu beachten.

Die Stahlrohre werden i. d. R. unmittelbar nach der Herstellung mit Zementmörtel ausgekleidet. Dafür werden die Rohre leicht geneigt auf eine Rollenbank gelegt und in sehr schnelle Rotation um die Längsachse versetzt. Über eine eingefahrene Lanze wird Zementmörtel (Zement-Sand-Wasser-Gemisch) während des Ziehens der Lanze kontinuierlich eingebracht. Der Zementmörtel verteilt sich durch die Fliehkräfte gleichmäßig dick auf der Rohrinnenwand in dichtester Packung (Dichtetrennung Sand/Zement und Überschusswasser). Nach dem Stillstand des rotierenden Rohres läuft das abgeschiedene überschüssige Wasser auf dem grünstandfesten Mörtel, der einen w/z-Wert von rd. ~ 0,3 aufweist, ab. Anschließend werden die Rohre provisorisch verschlossen und direkt in die Wärmebehandlungskammer gerollt.

Muss der innere Korrosionsschutz nach jahrzehntelanger Nutzung der Rohre im verlegten Rohr erneuert werden, so werden die Rohre mechanisch bis auf den Stahl gereinigt. Die Zementmörtelauskleidung wird hergestellt, indem ein auf den Rohrdurchmesser angepasster Fertiger mit Schleuderkopf und Rotationsflügelglätter an einem Stahlseil durch das leere Rohr gezogen wird. Der Zementmörtel wird dem Fertiger kontinuierlich über einen Druckschlauch zugeführt.

14.5 Estrich

Einen großen Bereich in der Baustoffgruppe Mörtel und Beton stellen die zementgebundenen Estriche dar. Ein *Estrich* ist nach DIN 18 560 ein auf einem tragenden Untergrund oder auf zwischenliegenden Trenn- oder Dämmschichten hergestelltes Bauteil, das unmittelbar nutzfähig ist und mit einem Belag versehen werden kann.

Estriche werden nach ihrem Anwendungsbereich unterschieden und in Konstruktionsarten untergliedert. Sie werden entsprechend ihrer Zusammensetzung definiert und in Klassen nach Druckfestigkeiten eingeteilt. Man unterscheidet Anhydritestriche, Gussasphaltestriche, Magnesiaestriche und Zementestriche, die auch als Hartstoffestriche ausgeführt werden können.

Nach DIN 18560 ist ein Zementestrich ein Estrich, der aus Zement, Zuschlag und Wasser sowie ggf. unter Zugabe von Zusätzen hergestellt wird. Zementestriche lassen sich bis zu einem Größtkorn von 4 mm den Mörteln zuordnen. Bei Zementestrichen mit gröberen Zuschlägen spricht man von Estrichbeton. Zementestrichmörtel weisen wesentlich höhere Druckfestigkeiten als Zementmauermörtel auf und werden im Gegensatz zur üblichen Mörtel- und Betonkonsistenz meist erdfeucht verarbeitet. Zur Erhöhung der Verlegeleistung wurden auch selbstverlaufende Zementfließestriche entwickelt, die in der Regel als Werk-

Trockenmörtel auf die Baustelle geliefert werden. Die Festigkeitsklassen der Zementestriche sind in **Tafel II.14.5-1** dargestellt.

Jede Schicht eines Estrichs muss in Dicke, Rohdichte und mechanischen Eigenschaften möglichst gleichmäßig sein. Die Oberfläche soll eben sein, d. h. innerhalb der Ebenheitstoleranzen nach DIN 18202 liegen. Wesentliche Eigenschaften der Zementestriche sind ihre Beständigkeit bei Durchfeuchtung und ihr hoher Frostwiderstand. Sie gehören zur Baustoffklasse A 1 „nicht brennbar" und besitzen einen hohen Verschleißwiderstand. Ist ein Estrich rollenden, schleifenden und/oder stoßenden Beanspruchungen ausgesetzt, so sind erhöhte Anforderungen an den Verschleißwiderstand zu stellen (s. **Tafel II.14.5-1** und Abschn. II.7.5).

Bei der Herstellung eines schwindarmen und rissefreien Zementestrichs ist darauf zu achten, dass der Zementgehalt auf das notwendige Maß begrenzt wird. Außerdem ist eine günstige Sieblinie zu wählen. Für Estrichdicken bis 40 mm wird ein Zuschlaggrößtkorn von max. 8 mm empfohlen, für Estrichdicken über 40 mm von max. 16 mm.

Nach dem Mischen der Ausgangskomponenten bzw. dem Anmischen des Trockenmörtels mit Wasser wird der Estrich eingebracht, verteilt, verdichtet und abgezogen. Der Estrich darf sich beim Einbau nicht entmischen und muss gut verdichtet werden. Die Oberfläche erdfeuchter Estriche wird abgerieben oder geglättet. An der Estrichoberfläche darf es keine Anreicherung von Feinbestandteilen geben. Pudern, Nässen oder das Aufbringen von Feinmörtel ist unzulässig. Der Estrich ist mindestens drei Tage vor Austrocknen und wenigstens eine Woche vor schädigenden Einwirkungen zu schützen (s. E DIN 1045-3). Die Temperaturen müssen während der ersten drei Tage mindestens 5 °C betragen. Zementestriche können in allen Konstruktionsarten hergestellt werden.

Tafel II.14.5-1: Zementestriche, Festigkeitsklassen gemäß DIN 18560-1

Festigkeitsklasse	Konformitätsprüfung			Erstprüfung
	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
	kleinster Einzelwert (Nennfestigkeit) in N/mm²	Mittelwert jeder Serie (Serienfestigkeit) in N/mm²	Mittelwert jeder Serie (Serienfestigkeit) in N/mm²	Richtwert in N/mm²
ZE 12	≥12	≥15	≥3	18
ZE 20	≥20	≥25	≥4	30
ZE 30	≥30	≥35	≥5	40
ZE 40[1)]	≥40	≥45	≥6	50
ZE 50[1)]	≥50	≥55	≥7	60
ZE 55 M[1) 2)]	≥55	≥70	≥11	80
ZE 65 A[1) 2)]	≥65	≥75	≥9	80
ZE 65 KS[1) 2)]	≥65	≥75	≥9	80

[1)] Eignungsprüfung erforderlich
[2)] M, A, KS: Hartstoffgruppe nach DIN 1100 für hohen Verschleißwiderstand

Schwimmende Estriche nach DIN 18560 Teil 2 werden zur Verbesserung der Wärme-, Luft- und Trittschalldämmung von Rohdecken eingesetzt. Sie haben keine Verbindung zu angrenzenden Bauteilen. Sie sind in vertikaler und horizontaler Richtung „schwimmend" auf der Dämmschicht gelagert. Ihre Mindestdicke beträgt 35 mm.

Verbundestriche nach DIN 18560 Teil 3 sind unmittelbar begehbare Nutzestriche und Ausgleichsestriche. Sie sind vollflächig und kraftschlüssig mit dem Untergrund verbunden. Verbund-

estriche benötigen erforderlichenfalls eine Haftbrücke. Formänderungen des Untergrunds werden übertragen. Festigkeit und E-Modul müssen auf den Untergrund abgestimmt werden. Die Mindestdicke darf aus fertigungstechnischen Gründen nicht weniger als das 3-fache des Größtkorns sein. Die Nenndicke beträgt 25 bis 30 mm. Sie soll 50 mm nicht überschreiten.

Estriche auf Trennschicht nach DIN 18560 Teil 4 sind Estriche, die aus bautechnischen oder bauphysikalischen Gründen durch eine Trennschicht vom tragenden Untergrund getrennt sind. Sie können sich unabhängig vom Untergrund verformen. Die Mindestdicke beträgt 35 mm.

Um Schäden an Estrichen vorzubeugen, sind die Feldgrößen in Abhängigkeit vom Schwindverhalten durch Fugen (Bewegungs-, Scheinfugen) zu begrenzen. Durch diese Fugen werden unkontrollierte Risse vermieden. Dabei sollten Untergrundfugen übernommen und alle Bewegungs- und Untergrundfugen auch im Bodenbelag ausgebildet werden. Randfugen trennen den Estrich von den seitlich angrenzenden Bauteilen (z. B. dem Wandputz). Die eingebauten Randstreifen müssen vom tragenden Untergrund bis zur Oberfläche des Belags reichen und bei Heizestrichen eine Bewegung von mindestens 5 mm ermöglichen.

14.6 Einpressmörtel

Das vollständige Verpressen der Spannglied-Hüllrohre mit *Zementmörtel* schützt den *Spannstahl* vor Korrosion und stellt den *Verbund* her. Die Ausführungsqualität dieser Arbeit ist für die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der *Spannbetonbauweise* mit nachträglichem *Verbund* entscheidend.

Die „Anforderungen für üblichen *Einpressmörtel*" sind in der europäischen Norm DIN EN 447 angegeben (s. **Tafel II.14.6-1)**. Die dazugehörigen Prüfverfahren sind in DIN EN 445 beschrie-

Tafel II.14.6-1: Anforderungen an Einpressmörtel gemäß DIN EN 447

Fließvermögen (Eintauchversuch)	sofort nach dem Mischen ≥ 30 s, 30 min nach dem Mischen ≤ 80 s
Wasserabsonderung (Standzylinder)	nach 3 h ≤ 2 Vol.-%
Volumenänderung (Dosenverfahren)	≥ -1 Vol.-% $\leq +5$ Vol.-%
Druckfestigkeit (Zylinder Ø 100 mm, h = 80 mm)	$\beta_{28} \geq 30$ N/mm^2

ben. Anforderungen an die Durchführung der Einpressarbeiten werden in DIN EN 446 gestellt.

Wichtige Eigenschaften von Einpressmörtel sind z. B. hohe Fließfähigkeit, geringe Veränderung der Fließfähigkeit während der notwendigen Verarbeitungszeit, möglichst keine Volumenverminderung zwischen frischem und erstarrtem Mörtel und ausreichende Druckfestigkeit (mindestens 30 N/mm^2 nach 28 Tagen).

Einpressmörtel werden gemäß DIN EN 447 in Deutschland aus CEM I und Wasser unter Verwendung eines Zusatzmittels *(Einpresshilfe EH)* gemäß E DIN EN 934-4 hergestellt. Die Einpresshilfe soll den *Wasseranspruch* herabsetzen, das *Wasserabsetzen* verhindern, die *Fließfähigkeit* während des Einpressens verbessern und ein mäßiges *Quellen* bewirken (s. Abschnitt II.2.4.3).

Die Erfüllbarkeit der o. g. Anforderungen mit den vorgesehenen Ausgangsstoffen ist durch eine allgemeine Erstprüfung im Labor und eine weitere vor der Verwendung auf der Baustelle mit dem vorgesehenen Baustellengerät nachzuweisen. Darüber hinaus hat

die Bauaufsicht neuerdings eine Überwachungspflicht für den Verpressvorgang auf der Baustelle eingeführt. Bei Bauwerkstemperaturen unter +5 °C dürfen keine *Einpressarbeiten* ausgeführt werden, um ein frühzeitiges Gefrieren des eingepressten Zementmörtels auszuschließen. Es gibt zz. Bestrebungen, die Eigenschaften des Einpressmörtels gemäß Tafel II.14.6-1 noch zu verbessern, z. B. keine Volumenverminderung, länger anhaltende Konstanz des Fließvermögens. Dies könnte z. B. durch werksmäßig gezielt hergestellte Einpress-Trockenmörtel erreicht werden, die dann eventuell einer Europäischen Technischen Zulassung bedürften.

14.7 Zementmörtel gemäß E DIN 1045

Da E DIN 1045-2 noch keine Angaben enthält, wird hier noch auf die Angaben von DIN 1045 Bezug genommen. Der Zementmörtel besteht aus den gleichen Ausgangsstoffen wie Beton (s. Abschnitt II.1.1). Lediglich das Größtkorn ist auf 4 mm begrenzt. Der Mörtel dient z. B. dem Füllen von Fugen bei Fertigteilen und Zwischenbauteilen und muss als Baustellenmörtel ohne Erstprüfung folgende Anforderungen erfüllen:

- Zu verwenden ist Zement nach DIN 1164-1 der Festigkeitsklasse 32,5 R oder höher.
- Der Zementgehalt muss 400 kg/m^3 verdichteten Mörtels aufweisen.
- Der Zuschlag muss aus gemischtkörnigem Sand 0/4 mm bestehen.

Hiervon darf nur abgewichen werden, wenn Mindestdruckfestigkeiten nach 28 Tagen von 15 N/mm^2 am 10-cm-Würfel nach DIN 1048 Teil 5 nachgewiesen wurden. Wenn höhere Anforderungen vorliegen, ist alternativ die Verwendung eines entsprechenden Trockenbetons bzw. Trockenmörtels gemäß DAfStb-Richtlinie „Trockenbeton" [Ri8] zu empfehlen.

15 Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken

15.1 Planungsgrundsätze

Die *Instandsetzung* von Bauwerken, so weit sie die Gebrauchsfähigkeit und Sicherheit betrifft, ist eine Ingenieuraufgabe. Die Instandsetzung eines Bauteils oder Bauwerks, das gemäß DIN 1045 erstellt wurde oder werden sollte, ist so zu planen und auszuführen, dass die verlangten Gebrauchseigenschaften dauerhaft erreicht werden (s. Abschnitt II.3.1 und II.15.2). Die Instandsetzungsaufgabe wird in anderen Ingenieurbereichen erheblich präziser und konsequenter definiert als im Bauwesen. **Tafel II.15.1-1** zeigt Definitionen zum Begriff „Instandhaltung" in Anlehnung an DIN 31051. Die *Instandhaltung* umfasst *Wartung*, *Inspektion* und *Instandsetzung*. Jede festgestellte Abweichung zwischen *Istzustand* und *Sollzustand* stellt einen *Mangel* dar und erfordert eine Entscheidung über die zu treffenden Maßnahmen. Der Mangel kann z. B. einen verminderten *Abnutzungsvorrat* beinhalten, siehe **Bild II.15.1-1**. Wenn der *Abnutzungsvorrat* durch Korrosion, Verschleiß usw. aufgezehrt ist, wird die Grenze der Brauchbarkeit (Gebrauchsfähigkeit, Funktionsfähigkeit) erreicht. Wird sie unterschritten, spricht man von einem *Schaden*.

15.2 Regelwerke für die Instandsetzung von Betonbauwerken

Die Pflicht zur Instandhaltung von Bauwerken folgt aus der Musterbauordnung (MBO), worin gefordert wird, „dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben,

Tafel II.15.1-1: Definitionen zum Begriff „Instandhaltung" (in Anlehnung an DIN 31051)

Instandhaltung: Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustands sowie zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands von technischen Mitteln eines Systems (Bauwerks). Sie umfasst die Maßnahmen der *Wartung, Inspektion und Instandsetzung.*
Wartung: Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustands von technischen Mitteln eines Systems (Bauwerks)
Inspektion: Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands von technischen Mitteln eines Systems (Bauwerks)
Instandsetzung: Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustands von technischen Mitteln eines Systems (Bauwerks)

Zustand: Der Zustand umfasst die Gesamtheit der Merkmale, die das Maß der Eignung der Betrachtungseinheit für den vorgesehenen Verwendungszweck ausdrücken
Istzustand: Der in einem gegebenen Zeitpunkt festgestellte Zustand eines Bauwerks oder einzelner Teile
Sollzustand: Der für den jeweiligen Fall festgelegte (geforderte) Zustand eines Bauwerks oder einzelner Teile
Abweichung (Sollzustandsabweichung): Nichtübereinstimmung zwischen dem Istzustand und dem Sollzustand einer Betrachtungseinheit zu einem gegebenen Zeitpunkt

Abnutzung: Abbau des Abnutzungsvorrats infolge physikalischer und/oder chemischer Einwirkungen, z. B. Verschleiß, Alterung, Korrosion oder auch plötzlich auftretende Istzustandsveränderung wie z. B. ein Bruch
Abnutzungsvorrat: Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, die einer Betrachtungseinheit aufgrund der Herstellung oder aufgrund der Wiederherstellung durch Instandsetzung innewohnt

Mangel: Zustand einer Betrachtungseinheit vor der ersten Funktionserfüllung, bei dem mindestens ein Merkmal fehlt, wodurch der Sollzustand nicht erreicht wurde. Unter der ersten Funktionserfüllung ist auch die Funktionserfüllung zu verstehen, die nach einer Instandsetzung erfolgt
Schaden: Zustand einer Betrachtungseinheit nach Unterschreiten eines bestimmten (festzulegenden) Grenzwerts des Abnutzungsvorrats, der eine im Hinblick auf die Verwendung unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit bedingt

Ursachen: Objektive Sachverhalte, die eine Abweichung bewirken

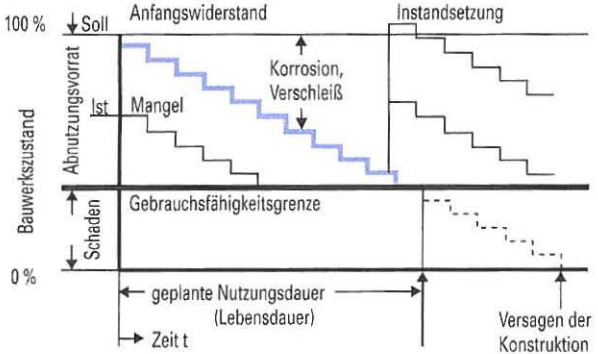


Bild II.15.1-1: Mögliche Veränderung des Bauwerkzustands während der Nutzungsdauer

Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden". Die von der obersten Bauaufsichtsbehörde durch öffentliche Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen eingeführten technischen Regeln sind zu beachten.

Für die Instandsetzung von Betonbauwerken, die gemäß DIN 1045 oder DIN 4227 hergestellt wurden oder zukünftig gemäß E DIN 1045 hergestellt werden, gilt die DAfStb-„Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen" (DAfStb-Richtlinie SIB). Die vier Richtlinienteile wurden 1990 bis 1992 veröffentlicht:

Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze (8/1999) [Ri9],
Teil 2: Bauplanung und Bauausführung (8/1990) [Ri9],
Teil 3: Qualitätssicherung der Bauausführung (2/1991) [Ri10] (demnächst: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Bauausführung (2000)),

Teil 4: Qualitätssicherung der Bauprodukte (11/1992) [Ri11] (demnächst: Prüfverfahren (2000)).

Das Ziel, eine einheitliche Instandsetzungsrichtlinie für alle Bereiche des Beton- und Stahlbetonbaus aufzustellen, wurde in der ersten Ausgabe dieser Richtlinie noch verfehlt. Der Bundesminister für Verkehr (BMVBW) ließ, auf seine Bauwerke zugeschnitten, die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen" (ZTV-SIB 90) erarbeiten [Ri36]. Daneben besitzen die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonbauteilen" (ZTV-RISS 93) [Ri40] besondere Bedeutung, weil sie den derzeitigen technischen Stand für die Injektion von Zementleim (ZL) und Zementsuspension (ZS) enthalten. Weiterhin sind aus dem Bereich des BMVBW noch die ZTV W97 [Ri44] und die ZTV-Bel-B [Ri31, Ri32, Ri33] zu nennen.

Zurzeit wird die DAfStb-Richtlinie SIB überarbeitet. Es ist das erklärte Ziel, alle technisch relevanten Teile der ZTV-SIB und ZTV-RISS in die DAfStb-Richtlinie SIB aufzunehmen, sodass der Bundesverkehrsminister nur noch vertragliche Fragen gesondert regeln muss. Die nachfolgenden Angaben enthalten weitgehend auch die zu erwartenden Veränderungen der DAfStb-Richtlinie SIB 2000.

Auf der Grundlage der DAfStb-Richtlinie SIB können Instandsetzungen an Betonbauwerken auch gemäß E DIN 1045 und DIN 18551 durchgeführt werden, z. B. wenn einzelne Bauteile verstärkt oder ersetzt werden. Eine umfassende Literaturangabe über weitere deutsche Regelwerke verschiedenster Institutionen enthält z. B. [Hil2].

Die internationale Normung auf dem Gebiet der Instandsetzung von Betonbauteilen schreitet ebenfalls voran. Von der 10-teiligen Grundnorm DIN EN 1504, liegen einige Teile bereits im Ent-

wurf vor, ebenso von den dazugehörigen mehr als 90 Prüfnormen. Im Folgenden wird auf diese europäischen Normen nicht weiter eingegangen.

15.3 Planung, Instandsetzungsbaustoffe, Ausführung und Überwachung gemäß DAfStb-Richtlinie SIB

15.3.1 Planung

Die DAfStb-Richtlinie SIB [Ri9, Ri10, Ri11] regelt die Planung, Durchführung und Überwachung von Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen für Bauwerke und Bauteile aus Beton und Stahlbeton nach E DIN 1045, unabhängig davon, ob die Standsicherheit betroffen ist oder nicht. Sie kann sinngemäß auch für andere Betonbauwerke, z. B. Spannbetonbauwerke gemäß E DIN 1045-1 (DIN 4227) angewendet werden. Die Richtlinie SIB enthält jedoch keine Regeln für den Nachweis der Standsicherheit. Die in der DAfStb-Richtlinie SIB geregelten Schutz- und Instandsetzungsarbeiten sind:

a) Herstellung des dauerhaften Korrosionsschutzes der Bewehrung bei unzureichender Betondeckung,
b) Wiederherstellung des dauerhaften Korrosionsschutzes bereits korrodierter Bewehrung,
c) Erneuerung des Betons im oberflächennahen Bereich (Randbereich), wenn der Beton durch äußere Einflüsse oder infolge Korrosion der Bewehrung geschädigt ist,
d) Füllen von Rissen,
e) Vorbeugender zusätzlicher Schutz der Bauteile gegen das Eindringen von beton- und stahlangreifenden Stoffen, z. B. gemäß DIN 4030 (s. Tafel IV.3-3),
f) Erhöhung des Widerstands von Bauteiloberflächen gegen Abrieb und Verschleiß.

Die Richtlinie gilt für Stoffe, Stoffsysteme und Ausführungsverfahren,

- deren grundsätzliche Eignung durch Grundprüfungen [Ri9, Ri11] nachgewiesen ist
- oder die den Regelungen von E DIN 1045-2 oder von DIN 18551 entsprechen.

Nicht geregelt wird der Oberflächenschutz mit nichtmetallischen Werkstoffen für Bauteile aus Beton in verfahrenstechnischen Anlagen. Hierzu gilt DIN 28052 (z. Z. in Vorbereitung).

Die DAfStb-Richtlinie SIB verlangt ein planmäßiges Vorgehen im Sinne von DIN 31051 mit folgenden Maßnahmen:

- Beurteilung und Planung durch einen sachkundigen Planer,
- Ermittlung von Ist- und Sollzustand (s. Abschnitt II.15.1),
- Beurteilung der Standsicherheit,
- Angabe der Ursachen von Mängeln und Schäden [Gru8],
- Erstellung eines Instandsetzungskonzepts und eines Instandsetzungsplans,
- Aufstellung eines Instandhaltungsplans mit Angaben zu Inspektion und Wartung,
- Verwendung von Stoffen entsprechend der Richtlinie, für die die grundsätzliche Eignung in einer Grundprüfung nachgewiesen wurde und deren Herstellung überwacht wird,
- Ausführung durch Fachpersonal und Überwachung der Ausführung.

Die Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen betreffen den Beton und die Bewehrung. Nach einer ausreichenden Behandlung des Betonuntergrundes kommen grundsätzlich die auf **Bild II.15.3-1** a) bis f) dargestellten Maßnahmen für die Instandsetzung des Betons in Betracht:

a) Füllen von Rissen und Hohlräumen mit Reaktionsharz, Zementleim (ZL) oder Zementsuspension (ZS),

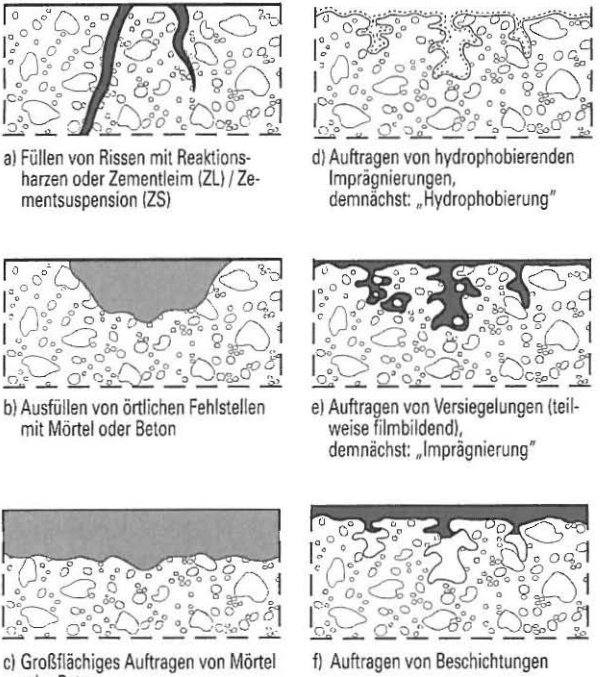


Bild II.15.3-1: Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen am Beton nach DAfStb-Richtlinie SIB

b) Ausfüllen örtlich begrenzter Fehlstellen mit Mörtel oder Beton,
c) großflächiges Auftragen von Mörtel oder Beton,
d) Auftragen von Hydrophobierungen,

e) Auftragen von Imprägnierungen (Versiegelungen),
f) Auftragen von Beschichtungen.

Zur Wiederherstellung eines dauerhaften *Korrosionsschutzes für die Bewehrung* werden folgende *Instandsetzungsprinzipien* angeboten:

R1: Realkalisierung durch flächigen Auftrag von alkalischem Beton bzw. Mörtel
R2: Örtliche Ausbesserung mit alkalischem Beton bzw. Mörtel
W: Begrenzung des Wassergehalts im Beton
C: Beschichtung der Bewehrung
K: Kathodischer Korrosionsschutz

Wenn erhöhte Chloridgehalte (Cl) im Beton vorliegen oder erhöhte Chloridbelastungen zu erwarten sind, werden noch einmal erhöhte Anforderungen im Rahmen der Instandsetzungsprinzipien gestellt, z. B. W-Cl.

15.3.2 Instandsetzungsbaustoffe und Ausführung

Teil 2 der DAfStb-Richtlinie SIB [Ri9] beschreibt die Arten, Eigenschaften und die Anforderungen an die Instandsetzungsbaustoffe. Entsprechend den auf Bild II.15.3-1 dargestellten Maßnahmen für die Instandsetzung des Betons gibt es *Rissfüllstoffe*, *Mörtel* und *Spachtelmassen* sowie *Oberflächenschutzsysteme* (OS).

In **Tafel II.15.3-1** sind die Arten und Anwendungsbereiche der Rissfüllstoffe aus Epoxidharz (EP), Polyurethanharz (PU) sowie Zementleim (ZL) und Zementsuspension (ZS) angegeben, mit denen die Risse und Hohlräume durch Tränkung oder Druckinjektionen gefüllt werden. Bei den Zementen für *Zementleim* handelt es sich in der Regel um Zemente gemäß DIN 1164 mit einer Mahlfeinheit ≥ 4500 cm^2/g (Blaine). Für *Zementsuspensionen* werden so genannte Feinstzemente eingesetzt mit Größtkorn

Tafel II.15.3-1: Anwendungsbereiche der Füllstoffe

	Feuchtezustand der Füllbereiche			
	trocken	feucht	„drucklos" wasserführend	„unter Druck" wasserführend
Ziel	zulässige Maßnahmen			
Schließen durch Tränkung	EP-T ZL-T[1)] ZS-T[1)]	 ZL-T ZS-T		
Schließen und Abdichten durch Injektion	EP-I PUR-I ZL-I[1)] ZS-I[1)]	EP-I PUR-I ZL-I ZS-I	PUR-I ZL-I ZS-I	PUR-I[2)] ZL-I[2)] ZS-I[2)]
dehnfähiges Verbinden	PUR-I	PUR-I	PUR-I	PUR-I[2)]
kraftschlüssiges Verbinden	EP-I ZL-I[1)] ZS-I[1)]	 ZL-I ZS-I	 ZL-I ZS-I	 ZL-I[2)] ZS-I[2)]

[1)] Flanken von Rissen und innere Oberflächen von Hohlräumen müssen ggf. vorgefeuchtet werden.

[2)] Ggf. unter Verwendung eines SPUR zur zeitweisen Reduzierung des Wasserzuflusses.

$d_{95} \leq 16$ µm. Meist handelt es sich hier um ein verwendungsbereites 2-Komponenten-System mit einer Flüssigkomponente aus Wasser und Zusatzmitteln.

In **Tafel II.15.3-2** sind die Arten und Anwendungsbereiche der vorgesehenen *Instandsetzungsmörtel* wiedergegeben. In der Grundprüfung sind Identifikationsmerkmale wie Kornzusammensetzung, Festkörpergehalt, Dichte, thermogravimetrische Analyse, Infrarot-Spektrum sowie anwendungsbezogene Eigenschaften wie Konsistenz, Verarbeitbarkeitsdauer, Ablaufneigung,

Tafel II.15.3-2: Instandsetzungsmörtel, Arten und Anwendungsbereiche

Beanspruchungsklasse	Stofftyp	Stoffbez.	Anwendungsbereich: für Instandsetzungsprinzip R	dyn. Beansp. bei Applik.	stat. Mitwirkung	Flächengröße	Flächenneigung	Anwendungsbeispiel
M1	Z	–	–	–	–	klein		Fassaden
M2	Z	PCCI	+	+	–	beliebig		Fahrbahn unter Belag
		PCCII	+	+	–			Brückenuntersichten, Widerlager,
M2	Z	SPCC	+	+	–			
M2	RH	PC-U	–	+	–	örtlich begrenzt		Fassaden
		PC-O	–	+	–			Fahrbahn unter Belag
M3	Z	E DIN 1045, DIN 18551	+	+	+	beliebig		Stützen, Platten, Balken, Fahrbahn

Z = zementgebunden
RH = reaktionsharzgebunden
\+ geeignet
– nicht geeignet

= mögliche Applikation auf verschieden geneigten Flächen

Druckfestigkeit, Haftzugfestigkeit, Schwinden, kapillare Wasseraufnahme, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand usw. nachzuweisen

Die Schutzfunktion der Oberflächenschutzsysteme (OS) wird im Wesentlichen gekennzeichnet durch

- Diffusionsfähigkeit gegenüber Wasserdampf (H_2O),
- Diffusionswiderstand gegenüber Kohlenstoffdioxid (CO_2),
- Witterungsbeständigkeit (Feuchte, Temperatur, UV-Strahlung),
- Rissüberbrückung,
- Verschleißfestigkeit.

Die Arten und Anwendungsbereiche der Oberflächenschutzsysteme sind in **Tafel II.15.3-3** wiedergegeben.

Die Anforderungen an die ausführenden Betriebe und die Überwachung der Ausführung sind im Teil 3 der DAfStb-Rili SIB [Ri10] festgelegt. Dieser Teil enthält auch umfangreiche Auflistungen der Prüfverfahren auf der Baustelle [Gru8, Hil2].

15.3.3 Überwachung

Um die „Instandsetzung der Instandsetzung" zu vermeiden und die Anforderungen an die Standsicherheit wie bei einer Erstausführung zu erfüllen, werden folgende qualitätssichernde Maßnahmen in der DAfStb-Richtlinie SIB verlangt:

- Die Planung muss durch sachkundige Planer erfolgen. Sie muss alle Ergebnisse schriftlich enthalten, die zur Feststellung des Istzustands und zur Festlegung des Sollzustands führten. Pläne für alle auszuführenden Arbeiten müssen vorliegen. Der für die Standsicherheit des Bauwerks Verantwortliche muss für jede Phase der Ausführung benannt werden.
- Die ausreichenden Eigenschaften aller verwendbaren Schutz- und Instandsetzungsbaustoffe müssen durch eine Grundprüfung nachgewiesen sein. Die erforderlichen Eigenschaften

Tafel II.15.3-3: Arten und Anwendungsbereiche der Oberflächenschutzsysteme (OS)

Systembezeichnung	Kurzbeschreibung	Anwendungsbereiche
OS 1 (OS A)	Hydrophobierung	Feuchteschutz an vert. Flächen
OS 2 (OS B)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen	vorbeugender Witterungsschutz
OS 4 (OS C)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen (erhöhte Dichtheit)	wie vor und Eignung für Korrosions-Schutz-Prinzip W und C
OS 5a (OS DII) OS 5b (OS DI)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen	Witterungsschutz, Tausalzschutz
OS 7 (TL/TP-BEL-EP [Ri34])	Beschichtung unter Dichtungsschichten von befahrbaren Flächen	Grundierung, dünne Beschichtung (Brückenabdichtung)
OS 9 (OS E)	Beschichtung für nicht begehbare Flächen	Witterungs- und Tausalzschutz für Flächen mit Rissen
OS 10 (TL/TP-BEL-B3 [Ri32, Ri33])	Beschichtung, Dichtschicht, rissüberbrückend, für befahrbare Flächen	Abdichtung von Bauteilen mit Trennrissen (Brücke, Tunnelsohle)
OS 11 (OS F)	Beschichtung für befahrbare Flächen mit Rissüberbrückung	Abdichtung von Bauteilen mit Trennrissen (Parkhaus, Freidecks, Brückenkappen)
OS 13	Beschichtung für befahrbare Flächen mit starker mech. Belastung	offene Parkgaragen, Tiefgaragen

Eigenschaften	Bindemittel
Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme	Silan Siloxan
Reduzierung der – Wasseraufnahme, – Chlorideindringung, – Kohlendioxiddiffusion, Verbesserung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands, farbliche Gestaltung	Polymerdispersion, Mischpolymerisat (gelöst), Polyurethan (PUR)
wie vor mit begrenzter Rissüberbrückung	Polymerdispersion, Polymerzementgemisch
Verhinderung von – Wasseraufnahme, – Eindringen beton- und stahlangr. Stoffe, hitzebeständig bis 250 °C	Epoxidharz (EP)
Verhinderung - der Wasseraufnahme, - des Eindringens beton- und stahlangr. Stoffe Erhöhung des FTW, Rissüberbrückung	PUR, modifiziertes EP, Polymerdispersion, 2-K-Polymethylmethacrylat
wie OS 7 mit Rissüberbrückung unter Gussasphalt)	PUR
wie OS 9	PUR, modifiz. EP, 2-K-Methylmethacrylat
wie OS 9 plus Widerstand gegen Chemikalien, Verschleiß, Schlag und rückseitige Durchfeuchtung	PUR, modifiz. EP, 2-K-Methylmethacrylat

sind in der Richtlinie in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich stoffspezifisch aufgeführt. Die Übereinstimmung der Produkte mit den Regelungen der Richtlinie ist durch eine werkseigene Produktionskontrolle (WPK) und regelmäßige Fremdüberwachung (FÜ) nachzuweisen.

- Ausführen, Prüfen und Überwachen der Schutz- und Instandsetzungsarbeiten erfordern von dem Unternehmen den Einsatz einer qualifizierten Führungskraft, eines Bauleiters und von Baustellenfachpersonal, die mit ausreichenden Kenntnissen und Erfahrungen die ordnungsgemäße Ausführung, Überwachung und Dokumentation dieser Arbeiten sicherstellen.

15.4 Instandsetzung von brandbeanspruchten Betonbauteilen

Im Allgemeinen können Beton- und Stahl- bzw. Spannbetonbauteile, die während eines Brands im oberflächennahen Bereich z. B. durch Abplatzungen geschädigt wurden, instandgesetzt werden [Ruf3]. Gleiches gilt für Betonbauteile, die mit Chloriden bei der Verbrennung von PVC beaufschlagt wurden [Loc11].

Grundlage für eine sachgerechte Instandsetzung ist auch hier die Beurteilung der Standsicherheit, die Ermittlung der Schädigungstiefe im Beton und die Sicherung des dauerhaften Korrosionsschutzes für die Bewehrung.

16 Recycling im Betonbau

16.1 Restwasser- und Restbetonrecycling

Im Rahmen der Abfallvermeidung wird in nahezu allen Transportbeton- und Fertigteilwerken Deutschlands *Restbeton* und *Restwasser* aufbereitet (s. **Bild II.16.1-1**, Verfahren 1). Daneben werden zz. Verfahren zur direkten Wiederverwendung von Restwasser erprobt (s. Bild II.16.1-1, Verfahren 2), was allerdings mit einem wesentlich höheren Aufwand verbunden ist, um negative Auswirkungen auf die planmäßige Zusammensetzung des Betons zu vermeiden (s. Abschnitt II.2.4.3).

Aufbereitung von Restwasser und Restbeton (Verfahren 1)

Bei dem gegenwärtig gängigsten *Frischbetonrecycling*verfahren wird der noch nicht erhärtete Beton oder Mörtel in Restzuschlag und in Restwasser – eine wässrige Suspension von Feinstoffen $\leq 0{,}25$ mm – getrennt. Der beim Auswaschen von Restbeton und Restmörtel abgetrennte *Restbetonzuschlag* hat anlagentechnisch bedingt einen Korndurchmesser, der über 0,125 oder 0,250 mm [Bun2, Ri5, Sch17, Bre5, Fri2] liegt. Bei der Betonherstellung ist der zurückgewonnene Restbetonzuschlag dem Zuschlag der Korngruppe mit dem größten Korndurchmesser gleichmäßig im Massestrom so zuzugeben, dass die zulässigen Grenzwerte der DIN 4226 für das Überkorn und Unterkorn eingehalten werden.

Das Restwasser besteht in erster Linie aus einem Gemisch aus Wasser, Zement und weiteren mehlfeinen Stoffen und enthält auch das Wasser, das zum Reinigen der Mischfahrzeuge, Beton-

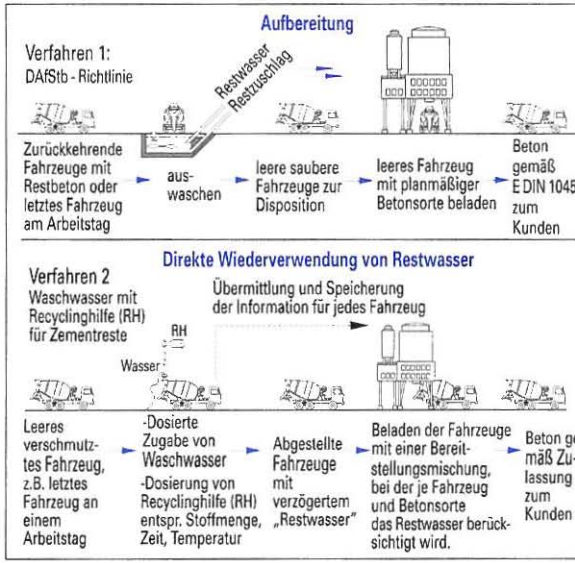


Bild II.16.1-1: Verfahren zum Frischbetonrecycling

pumpen usw. benutzt wird, sowie das auf den Produktionsflächen anfallende Niederschlagswasser.

Die Wiederverwendung von Restwasser als Zugabewasser (s. Abschnitt II.2.3) für Beton ist in der „Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [Ri5] geregelt. Danach dürfen dem Frischbeton mit dem Restwasser im Normalfall bis zu 18 kg/m³ und im Ausnahmefall kurzzeitig bis zu 35 kg/m³ Feststoffe zugeführt werden. Für

beide Fälle fordert die Richtlinie gesonderte Erstprüfungen, wenn es sich um Betone nach E DIN 1045 bzw. DIN 4227 handelt. Die Feststoffe im Restwasser müssen, z. B. durch Rührwerke, homogen verteilt oder durch eine ausreichend lange Verweilzeit im Absetzbecken abgeschieden werden. Die mehlfeinen Feststoffe im Restwasser sind bei der Bestimmung des Mehlkorngehalts der Betonmischung zu berücksichtigen. Um zu verhindern, dass Restwasser Bestandteile, z. B. aus Zusatzmitteln, enthält, die die Stahlkorrosion fördern, fordert die Richtlinie, dass alle im Restbeton oder Restmörtel enthaltenen Zusatzmittel die elektrochemische Prüfung nach der Richtlinie für Zuteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel [Ri23] bestanden haben müssen. Mit Fett oder Öl verunreinigtes Wasser ist gesondert aufzubereiten. Wie Untersuchungen [Spa1, Ric3] ergaben, werden Zusatzmittelwirkstoffe, z. B. von Fließmitteln (s. Abschnitt II.2.4) im Verlauf der Zementhydratation nahezu vollständig und irreversibel an die Zementpartikel gebunden. Deshalb ist eine praxisrelevante Aufkonzentration des Zusatzmittelwirkstoffs im Restwasserbecken unter normalen Produktionsbedingungen im Transportbetonwerk nicht möglich.

Aufgrund fehlender Erfahrungen darf Restwasser zz. nicht zur Herstellung von Beton mit Luftporenbildnern und von hochfestem Beton gemäß [Ri6] verwendet werden. Gegenwärtig laufende Untersuchungen sollen den Erfahrungsstand dahingehend erweitern, dass diese Restriktionen gegebenenfalls gelockert werden können.

16.2 Festbetonrecycling

16.2.1 Rezyklierter Zuschlag

In zunehmendem Maße werden ältere Bauten abgerissen bzw. zurückgebaut, deren Materialien im Sinne des Kreislaufwirt-

schafts- und Abfallgesetzes aufbereitet und als rezyklierte Zuschläge im Betonbau verwertet werden können. Art und Kornaufbau des Zuschlags beeinflussen neben der Verarbeitbarkeit und der Festigkeit auch das Verformungsverhalten und die *Dauerhaftigkeit* des Betons. *Rezyklierter Zuschlag* aus Beton nimmt hierbei eine besondere Stellung ein, da er nicht nur den ursprünglichen Zuschlag, sondern auch den Zementstein enthält. Bei Betonsplitt beträgt der Zementsteinanteil rd. 20%, bei Betonbrechsand bis zu 30%.

16.2.2 Frischbetoneigenschaften

Die Porosität des rezyklierten Zuschlags führt zu einem gegenüber Naturzuschlag erhöhten Wassersaugen, das erst nach längerer Zeit abgeschlossen ist (s. Abschnitt II.2.5). Trotz Vornässens des rezyklierten Zuschlags saugt dieser während der Herstellung und Verarbeitung des Betons Wasser auf. Bei Beton mit *Betonsplitt* ist diese zusätzliche *Wasseraufnahme* gering. Wird auch der *Betonbrechsand* anstelle von Natursand verwendet, macht sich dieses Wassersaugen stärker bemerkbar. Die Zementleim- oder Fließmittel- bzw. Verflüssigermenge muss gegenüber Beton mit natürlichen Zuschlägen erhöht werden, wenn der Beton mit rezykliertem Zuschlag den gleichen wirksamen w/z-Wert und die gleiche Konsistenz aufweisen soll wie Beton mit Normalzuschlag [Ker2].

16.2.3 Festbetoneigenschaften

Festigkeit, Permeabilität und Carbonatisierungsfortschritt des Betons werden durch Betonsplitt praktisch nicht und durch Betonbrechsand in nur geringem Maß beeinflusst. Dies gilt im Allgemeinen auch für den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, auch wenn der rezyklierte Zuschlag selbst keinen ausreichenden

Frostwiderstand (s. Abschnitt II.2.5) aufweist. Dagegen nimmt der Elastizitätsmodul bei Verwendung von Betonsplitt geringfügig ab, liegt aber immer noch innerhalb der Bandbreite, die bei Beton mit unterschiedlichen natürlichen Zuschlägen gegeben ist. Wird jedoch auch der Natursand durch Betonbrechsand ersetzt, fällt der E-Modul stärker ab, da der E-Modul des Betons in erheblichem Maße von dem des Zuschlags beeinflusst wird. Dieser ist bei rezykliertem Betonsplitt, insbesondere aber bei Betonbrechsand, aufgrund seiner hohen Porosität geringer als bei Normalzuschlag.

Ausgeprägte Unterschiede zwischen Beton mit rezykliertem Zuschlag und Normalzuschlag treten beim Schwinden und Kriechen des Betons auf. Je mehr natürlicher Zuschlag durch Betonsplitt bzw. Betonbrechsand ersetzt wird, desto größer wird der Einfluss auf die Verformungseigenschaften. So wird allein durch den Einsatz von Betonsplitt das Schwinden um rd. 50%, bezogen auf den Referenzbeton mit natürlichem Zuschlag, vergrößert. Wird der Natursand durch Betonbrechsand ersetzt, nimmt das Schwinden auf nahezu den doppelten Wert im Vergleich zum Beton mit ausschließlich natürlichem Zuschlag zu. Das Schwinden hängt u. a. von dem E-Modul des Zuschlags ab. Rezyklierter Zuschlag hat wegen des anhaftenden Mörtels einen geringeren E-Modul als Normalzuschlag. Zusätzlich werden die Schwindverformungen durch das Schwinden des mit dem Betonbruch, besonders mit dem Betonbrechsand, eingebrachten Zementsteins vergrößert [Ker2].

Die Möglichkeit einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion muss bei der Verwendung von rezykliertem Zuschlag in Betracht gezogen werden. Der rezyklierte Zuschlag kann einen alkaliempfindlichen Primärzuschlag und gleichzeitig einen hohen Alkaligehalt aufweisen, sodass in sehr feuchter Umgebung schon ohne weitere Alkalizufuhr eine schädigende Reaktion auf-

treten kann. Darüber hinaus wird durch den neuen Zementleim der Alkaligehalt weiter erhöht. (s. Abschnitt II.7.6)

16.2.4 Richtlinie

Die vorgenannten Untersuchungsergebnisse haben ihren Eingang in die im August 1998 erschienene DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag" [Ril] gefunden. Die Einsatzmenge an rezykliertem Zuschlag im Beton wurde begrenzt, damit Beton mit rezykliertem Zuschlag wie Beton mit Normalzuschlag eingesetzt werden kann, ohne dass bei der Planung, Bemessung und Herstellung gesonderte Maßnahmen zu treffen sind. Bei Außenbauteilen muss vorab geklärt werden, ob der Zuschlag alkaliunempfindlich ist. Wenn das der Fall ist, können 20 Vol.-% Betonsplitt, jedoch kein Betonbrechsand verwendet werden. Für Innenbauteile gilt die Einschränkung hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeit nicht, und es dürfen zurzeit 7 Vol.-% Brechsand und 25 bzw. 35 Vol.-% Betonsplitt eingesetzt werden.

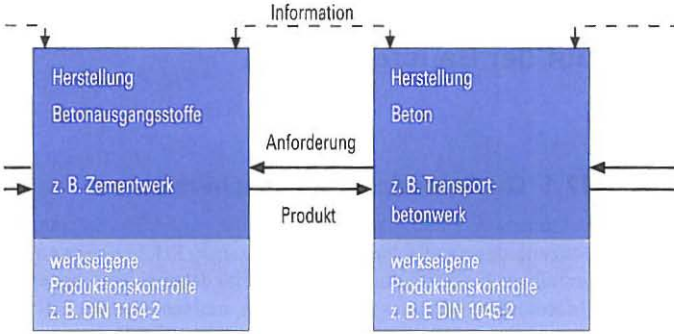
Derzeit wird die Richtlinie überarbeitet, um auch rezyklierte Zuschläge mit höheren Anteilen an Mauerwerkssplitt im Beton einsetzen zu können (s. Abschnitt II.2.5).

17 Qualitätssicherung im Werk und auf der Baustelle

17.1 Qualitätssicherungsnachweise

Betonbauwerke und -bauteile werden für vergleichsweise lange Nutzungsdauern errichtet. Der zuverlässigen Erfüllung der an sie gestellten Qualitätsanforderungen kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Um dies sicherzustellen, müssen alle Herstellabläufe zielgerichtet und kontrolliert, d. h. *qualitätsgesichert* erfolgen. Das umfasst die Herstellung von Beton mit den geforderten Eigenschaften aus den verschiedenen Ausgangsstoffen sowie dessen Weiterverarbeitung, bestehend aus den Arbeitsschritten Fördern, Einbau, Verdichten und Nachbehandeln zur Herstellung von Betonbauwerken oder –bauteilen. In die Qualitätskette ist auch die Herstellung, Gewinnung und Verarbeitung der Betonausgangsstoffe Zement, Zuschlag, Betonzusatzstoffe und Zusatzmittel aus den jeweiligen Rohstoffen und Zwischenprodukten einzubeziehen (**Bild II.17.1-1**).

An der Leistungserbringung sind verschiedene Partner, wie z. B. Zementwerk, Transportbetonwerk und Bauunternehmen, beteiligt. An der Schnittstelle zwischen Abnehmer und Hersteller müssen daher die jeweils zu erfüllenden Qualitätsanforderungen vereinbart werden. Diese umfassen alle produkt- und leistungsbezogenen Vorgaben, die notwendig sind, ein vereinbartes Qualitätsziel eindeutig zu beschreiben. Die Mindestanforderungen an Baustoffe und deren Herstellung werden traditionell durch bauaufsichtlich eingeführte Normen und Regeln vorgegeben und deren Erfüllung durch entsprechende Übereinstimmungsverfahren nachgewiesen. Ergänzend dazu ist ein ausreichender



Informationsfluss in beide Richtungen zwischen Hersteller und Kunde von Bedeutung. Elemente des Informationsaustausches können in Qualitätsgesprächen sowie in der Aufzeichnung und im Austausch von Kennwerten bestehen. In einem Gemeinschaftsprojekt von Zement- und Transportbetonindustrie wurde ein entsprechendes Konzept entwickelt und in einer Pilotphase mit mehreren Werken erprobt [BTB1].

Das Baurecht fordert seit jeher, bauliche Anlagen so zu errichten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung nicht gefährdet werden. Bauprodukte dürfen nur verwendet werden, wenn die daraus hergestellten baulichen Anlagen standsicher und gebrauchstauglich sind. Öffentliche Sicherheit durch Gefahrenabwehr ist das Schutzziel, zu dessen Erreichung die Landesbauordnungen die Einhaltung von allgemein anerkannten Regeln der Technik und eine bauaufsichtliche Überwachung von Baustoffen fordern und dadurch deren Eignung für die jeweilige Verwendung feststellen. Seit In-Kraft-Treten der Europäischen Bauproduktenrichtlinie [Ri25] und deren nationaler Umsetzung als Bauproduktengesetz sind Festlegungen für das Inverkehr-

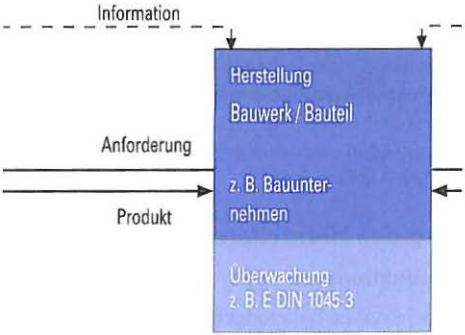


Bild II.17.1-1: Qualitätskette für die Herstellung und Verarbeitung von Beton

bringen und den freien Warenverkehr von Bauprodukten hinzugekommen.

Für welche Bauprodukte ein Verwendbarkeitsnachweis gefordert wird, ist in der durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) jährlich herausgegebenen Bauregelliste [Ri20] festgelegt. Darin sind für jedes bauaufsichtlich geregelte Bauprodukt die anzuwendenden „technischen Regeln" und die Art des zu führenden *Übereinstimmungsnachweises* tabellarisch zusammengestellt. Die Landesbauordnungen sehen als Übereinstimmungsnachweise eine Übereinstimmungserklärung des Herstellers (ÜH), ggf. nach vorheriger Prüfung durch eine anerkannte Prüfstelle (ÜHP), oder ein Übereinstimmungszertifikat durch eine Zertifizierungsstelle (ÜZ) vor. Bei wesentlichen Abweichungen des Bauprodukts von den technischen Regeln wird entweder eine bauaufsichtliche Zulassung oder ein bauaufsichtliches Prüfzeugnis gefordert. Wegen der Bedeutung für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Betonbauwerken wird derzeit für Betone nach DIN 1045 und die zugehörigen Ausgangsstoffe, z. B. Zement nach DIN 1164, grundsätzlich ein

Übereinstimmungsnachweis durch ein Übereinstimmungszertifikat (ÜZ) gefordert. Voraussetzung für die Erteilung eines Übereinstimmungszertifikats durch eine Zertifizierungsstelle ist zum einen eine werkseigene Produktionskontrolle durch den Hersteller und zum anderen eine Fremdüberwachung durch eine Überwachungsstelle. Zertifizierungs- und Überwachungsstellen bedürfen der bauaufsichtlichen Anerkennung.

17.2 Verantwortung des Herstellers

17.2.1 Werkseigene Produktionskontrolle

Die Verantwortung, dass das jeweilige Bauprodukt die gestellten Normanforderungen erfüllt, liegt ausschließlich beim Hersteller. Alle Arten des Übereinstimmungsnachweises für Bauprodukte enthalten daher Forderungen an die *werkseigene Produktionskontrolle*, d. h. eine ständige Eigenüberwachung der Produktion durch den Hersteller, um sicherzustellen, dass das Bauprodukt die gestellten Anforderungen erfüllt. Der erforderliche Umfang hängt dabei von den Eigenschaften des Bauprodukts, seiner Zusammensetzung und dem Schwierigkeitsgrad der Produktion ab. Die werkseigene Produktionskontrolle besteht zum einen aus Überwachungsprüfungen des versandbereiten Bauprodukts und zum anderen aus der Qualitätslenkung während der Herstellung des Bauprodukts, wobei produktspezifisch in den entsprechenden Normen der Schwerpunkt entweder mehr auf den Überwachungsprüfungen am Endprodukt oder auf den produktionsbegleitenden Maßnahmen zur Qualitätslenkung liegt. Für Zement ist im **Bild II.17.2-1** exemplarisch der durch die werkseigene Produktionskontrolle gemäß DIN 1164-2 [Thi5] erfasste Herstellprozess dargestellt (s. Abschnitt I.3.2.4). Dieser Herstellprozess wird durch ein Werkqualitätshandbuch von dem Hersteller als Grundlage seiner werkseigenen Produktionskontrolle dokumentiert und durch die Überwachungsstelle zur Anerken-

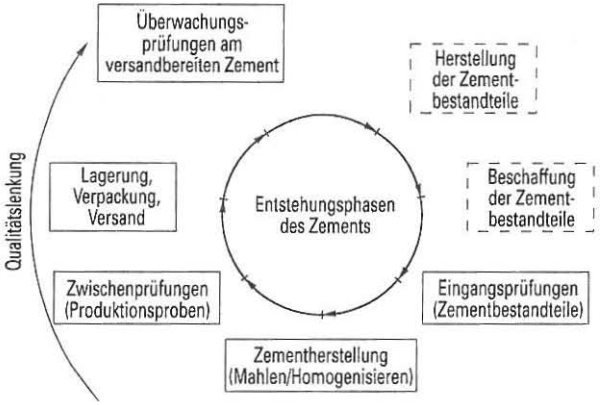


Bild II.17.2-1: Durch die werkseigene Produktionskontrolle des Herstellers gemäß DIN 1164-2 erfasster Prozess der Zementherstellung

nung und Bewertung der werkseigenen Produktionskontrolle herangezogen.

17.2.2 Überwachungsprüfungen

Zum Nachweis der Übereinstimmung (Übereinstimmungslenkung) der Eigenschaften und der Zusammensetzung des Bauprodukts mit den Anforderungen und Übereinstimmungskriterien der jeweiligen Produktnorm (s. Tafel II.1.1-1) müssen vom Hersteller regelmäßige *Überwachungsprüfungen* durchgeführt werden. Diese Prüfungen erfolgen am fertig hergestellten, versandbereiten Bauprodukt und damit an der Schnittstelle zum jeweiligen Abnehmer (Bild II.17.2-1). Die zu erfüllenden Anforderungen sind meistens statistisch als Quantile einer angenommenen Ver-

teilung definiert und demzufolge als charakteristische Werte festgelegt. Besonders wichtige Anforderungswerte, wie die untere Begrenzung der Zement- oder Betondruckfestigkeit, sind meistens als 5%-Quantile, andere als 10%-Quantile definiert.

Bei der bei den meisten Baustoffen üblichen kontinuierlichen oder chargenweisen Produktion homogener Massengüter ist eine vollständige Prüfung der gesamten Produktion weder möglich, noch sinnvoll. Zur Beurteilung wird daher eine begrenzte Anzahl an repräsentativen Stichproben herangezogen, die aus der hergestellten Produktionsmenge entnommen wird. Durch die Prüfung von Stichproben verbleibt sowohl ein Risiko für den Abnehmer, dass Teilmengen mit nicht normgerechten Eigenschaften als normkonform erklärt werden (Abnehmerriskio), als auch ein Risiko für den Hersteller, dass normgerechte Teilmengen beim statistischen Nachweis als nicht normkonform eingestuft werden (Herstellerrisiko) [Bon5]. Dieses Risiko sollte so gering wie technisch sinnvoll und wirtschaftlich verträglich gehalten werden. Dies kann durch die Wahl eines geeigneten Stichprobenumfangs n im Überprüfungszeitraum und einer zulässigen Annahmewahrscheinlichkeit erfolgen. Um mögliche Veränderungen in den Produkteigenschaften statistisch abgesichert erfassen zu können, enthalten die einzelnen Normen Festlegungen zur erforderlichen Probenahme- und Prüfhäufigkeit (für Zement s. Abschnitt I.2.3). So sind nach E DIN 1045-2 bei stetiger Herstellung von Normalbeton mindestens eine Probe je 400 m^3 bzw. Produktionswoche pro Sorte bzw. Betonfamilie zu entnehmen. Weiterhin werden zur Eingrenzung von Einflüssen auf das Prüfergebnis Art und Ort der Probenahme und die anzuwendenden Prüfverfahren vorgegeben.

Für Beton nach Zusammensetzung und Standardbeton ist durch den Hersteller lediglich die Einhaltung der festgelegten Zusammensetzung nachzuweisen **(Bild II.17.2-2)**. Für alle wesentlichen

Merkmale von Beton nach Eigenschaften, wie Druck- und Zugfestigkeit, Rohdichte, w/z-Wert, Luftgehalt usw. sind in E DIN 1045-2 die einzuhaltenden Übereinstimmungskriterien genannt. Bei den Übereinstimmungskriterien für die Druckfestigkeit (**Tafel II.17.2-1**) wird zwischen Erstherstellung bei neu anlaufender Produktion und stetiger Herstellung unterschieden. Bei stetiger Herstellung muss der Mittelwert $\bar{f}$ aus 15 unmittelbar aufeinander folgenden Prüfergebnissen die geforderte charakteristische Festigkeit f_{ck} um mindestens $1{,}48 \cdot \sigma$ übersteigen. Die Standardabweichung der Produktion wird aus den letzten 35 aufeinander folgenden Prüfergebnissen berechnet; es muss jedoch mindestens mit 3 N/mm² gerechnet werden. Der Faktor 1,48 ist die zugehörige Annahmekonstante, der vorzusehende Sicherheitsabstand ist etwas geringer als nach der alten DIN 1045 (Faktor 1,64). Darüber hinaus darf kein Einzelergebnis f_i die geforderte charakteristische Festigkeit um mehr als 4 N/mm² unterschreiten.

Der Hersteller hat die Möglichkeit, für den Übereinstimmungsnachweis bestimmte Betonsorten zu einer so genannten *Betonfamilie* zusammenzufassen. Voraussetzung ist, dass ein verlässlicher Zusammenhang zwischen den maßgebenden Eigenschaften besteht und dokumentiert ist. Aus diesem Grund dürfen nur Betone zusammengefasst werden, die sich hinsichtlich der Ausgangsstoffe und der Festigkeitsklassen nicht bzw. nicht zu stark unterscheiden. Durch dieses Zusammenfassen kann der Prüfaufwand reduziert und bei selten produzierten Betonsorten frühzeitig eine statistisch belegte Aussage getroffen werden. Als zusätzliche Sicherheit wurde in E DIN 1045-2 für die Druckfestigkeit ein weiteres Übereinstimmungskriterium festgelegt, das für jedes einzelne Familienmitglied gilt.

Vor Verwendung einer neuen Betonsorte muss eine *Erstprüfung* (Eignungsprüfung) durchgeführt werden, um nachzuweisen, dass mit der vorgesehenen Betonzusammensetzung die fest-

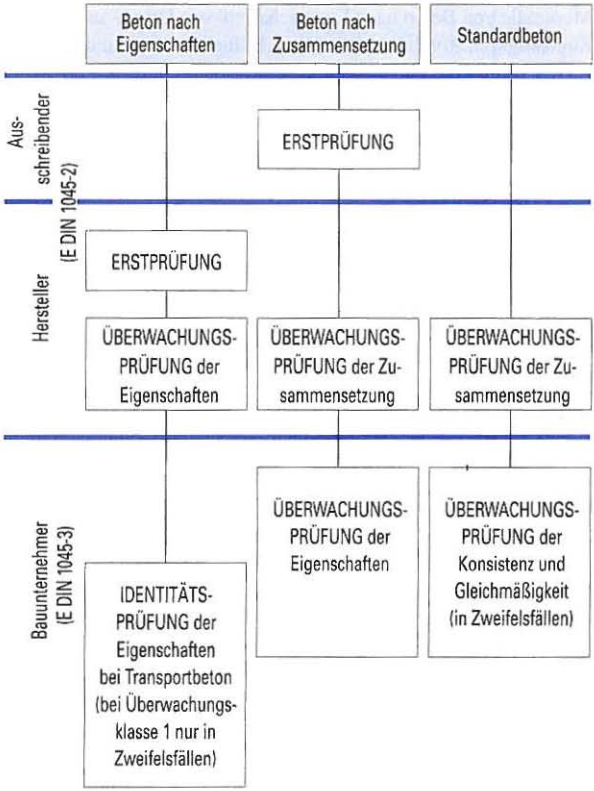


Bild II.17.2-2: Unter der Verantwortung des Ausschreibenden, des Herstellers bzw. des Bauunternehmers durchzuführende Betonprüfungen

Tafel II.17.2-1: Übereinstimmungs- und Annahmekriterien für die Druckfestigkeit in N/mm² für Beton < C 60/75 bzw. < LC 55/60

	E DIN 1045-2		E DIN 1045-3
Stichprobenumfang	Erstherstellung[1)]	stetige Herstellung	Identitätsprüfung
1	$f_i \geq f_{ck} - 4$	$f_i \geq f_{ck} - 4$	$f_i \geq f_{ck} - 4$
3	$\bar{f} \geq f_{ck} + 4$	–	$\bar{f} \geq f_{ck} + 1$
5	–	–	$\bar{f} \geq f_{ck} + 2$
15	–	$\bar{f} \geq f_{ck} + 1{,}48 \cdot \sigma$[2)]	$\bar{f} \geq f_{ck} + 0{,}97 \cdot \sigma$[3)]

[1)] Bis mindestens 35 Proben geprüft wurden.
[2)] σ wird aus den letzten 35 Werten berechnet ($\sigma \geq 3$ N/mm²)
[3)] $\bar{f} \geq f_{ck} + (1{,}645 - 2{,}576/\sqrt{n}) \cdot \sigma$ für $n > 6$

gelegten Eigenschaften mit einem ausreichenden Vorhaltemaß v erreicht werden. Diese Prüfung ist nur bei Beton nach Eigenschaften durch den Hersteller durchzuführen (Bild II.17.2-2). Bei Beton nach Zusammensetzung und Standardbeton ist ein entsprechender Nachweis durch den Ausschreibenden bzw. die Normenorganisation zu erbringen.

17.2.3 Qualitäts- und Produktionslenkung

Die zur Erzielung eines normkonformen Produkts ergriffenen qualitätslenkenden Maßnahmen liegen in der alleinigen Verantwortung des Herstellers. Um jedoch das notwendige Vertrauen in die zuverlässige Herstellung zu schaffen und die Ergebnisse der Überwachungsprüfungen abzusichern, werden ergänzend Anforderungen an die *Qualitäts-* und Produktions*lenkung* gestellt (Bild II.17.2-1). Der Hersteller muss die von ihm angewandten Arbeitstechniken und Tätigkeiten, mit denen sicherge-

stellt wird, dass das Bauprodukt die Anforderungen erfüllt, darlegen und in einem sinnvollen Rahmen dokumentieren. Ein geeignetes Produktionslenkungssystem, qualifiziertes Personal und die notwendigen Produktionseinrichtungen sind nachzuweisen. Für Beton sind die Verfahren für die Baustoffüberwachung, die Produktionssteuerung (Dosieren, Mischen), das Wartungssystem, die Prüfung der Herstellverfahren und Betoneigenschaften, das Vorgehen bei Abweichungen und die Übereinstimmungslenkung zu beschreiben.

Die in den Produktnormen zur werkseigenen Produktionskontrolle festgelegten Anforderungen an die Verfahren zur Qualitäts- und Produktionslenkung, z. B. für Zement in DIN 1164-2, regeln den zur gezielten Herstellung normgerechter Produkte notwendigen Umfang der Qualitätssicherung. Die aus Sicht der Produktqualität erforderlichen Aspekte sind damit abgedeckt. Qualitätsmanagementsysteme nach ISO 9000 ff haben eine andere Zielausrichtung. Sie sind Führungsinstrumente zur Optimierung von Organisationsstrukturen und Geschäftsprozessen in Hinblick auf Nutzen-, Kosten- und Risikobetrachtungen.

17.3 Aufgaben der anerkannten Stellen

Durch die Einschaltung einer anerkannten Stelle wird zusätzliches Vertrauen in die vom Hersteller ergriffenen qualitätssichernden Maßnahmen geschaffen [Bre6]. Die Fremdüberwachung wird durch eine anerkannte Überwachungsstelle durchgeführt. Hauptaufgabe ist die regelmäßige Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle des Herstellers. Darüber hinaus sind je nach Bauprodukt (z. B. Zement) Fremdüberwachungsprüfungen zur Bestätigung der Ergebnisse der Überwachungsprüfungen des Herstellers vorgesehen. Werden Nichtübereinstimmungen festgestellt, so sind besondere Maßnahmen zu ergreifen.

Die anerkannte Zertifizierungsstelle führt eine Beurteilung und abschließende Bewertung der Ergebnisse der Fremdüberwachung durch. Als Bestätigung wird ein Übereinstimmungszertifikat ausgestellt, mit dem die Berechtigung zum Führen des bauaufsichtlich geforderten Übereinstimmungszeichens Ü verliehen wird. Bei Vorliegen von europäisch harmonisierten Regelwerken wird zukünftig das CE-Zeichen vergeben. Während bei Zement die notwendigen Voraussetzungen für eine baldige Vergabe des CE-Zeichens geschaffen wurden, ist hiermit bei Beton in den nächsten Jahren nicht zu rechnen.

17.4 Identitäts-, Annahme- und Kontrollprüfungen

Der Abnehmer des Betons oder Betonausgangsstoffs vergewissert sich jeweils anhand der Lieferdokumente, ob das gelieferte Produkt mit dem bestellten übereinstimmt. Darüber hinaus ist es ihm überlassen, ob er im Einzelfall auf der Grundlage von *Annahmeprüfungen* die Übereinstimmung mit den vereinbarten Qualitätsanforderungen prüft. Bei Baumaßnahmen der öffentlichen Hand, z. B. im Betonstraßenbau, werden zusätzliche Kontrollprüfungen durch den Bauherrn veranlasst. Die für jedes Einzelergebnis festgelegten Anforderungswerte der Normen und Regelwerke können hier als Beurteilungsmaßstab herangezogen werden.

Besondere Verhältnisse liegen bei Transportbeton vor, der als Frischbeton vom Transportbetonhersteller an das weiterverarbeitende Bauunternehmen übergeben wird und dessen Eigenschaften sich durch den Transport verändern können. Auswertungen von Baustellenergebnissen [Kön2] zeigen, dass dies zu einer höheren Standardabweichung der Prüfergebnisse bei etwa gleich bleibendem Mittelwert und damit zu einem Absinken der 5%-Fraktile führen kann (**Bild II.17.4-1**). Um eine Beurteilung der Druckfestigkeit auf der Baustelle zu ermöglichen, sind in

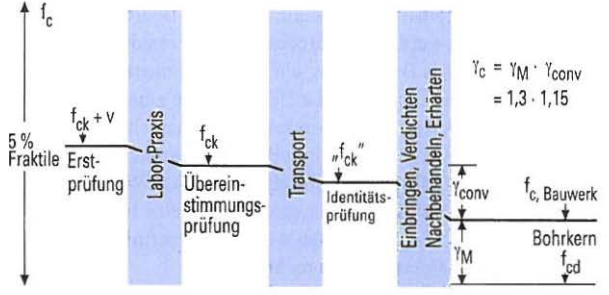


Bild II.17.4-1: Veränderung der Druckfestigkeit vom Mischungsentwurf zum eingebauten Beton (nach [Kön2])

E DIN 1045-3 entsprechende Kriterien festgelegt, deren Erfüllung durch Identitätsprüfungen nachzuweisen ist (Bild II.17.2-2, Tafel II.17.2-1). Eine Identitätsprüfung ist nur bei Betonen mit besonderen Anforderungen an die Festigkeitsklasse (C 30/37), die Expositionsklasse oder die Betoneigenschaften verpflichtend. Vergleichbar der bisherigen BII-Überwachung sind bei diesen Betonen die maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften regelmäßig zu überprüfen und der Betoneinbau zu überwachen.

Die Auswertungen in [Kön2] zeigten auch, dass die Unterschiede zwischen dem charakteristischen Wert der Druckfestigkeit f_{ck} beim Übereinstimmungsnachweis und der Bauwerksdruckfestigkeit $f_{c,Bauwerk}$, die sich durch die Einflüsse von Transport, Einbringen, Verdichten, Nachbehandeln und Erhärten ergeben, durch den in E DIN 1045-1 für die Bauwerksbemessungen festgelegten Teilsicherheitsbeiwert γ_{conv} von 1,15 ausreichend abgedeckt sind. Der Faktor γ_M berücksichtigt eine ungünstige Abweichung der Bauwerksfestigkeit von der Bemessungsfestigkeit f_{cd} (s. Bild II.17.4-1).

18 Umweltverträglichkeit

18.1 Überblick

Anforderungen an die *Umweltverträglichkeit* von Baustoffen und Bauprodukten resultieren zuerst einmal aus dem Schutz der unmittelbaren Umwelt einer baulichen Anlage. Daneben gewinnt die Betrachtung der Auswirkungen des Bauens auf die regionale und globale Umwelt und damit auf die natürlichen Lebensgrundlagen zunehmend an Bedeutung.

Für das Inverkehrbringen von Bauprodukten sind die gesetzlichen Regelungen des europäischen und nationalen Gefahrstoffrechts zu beachten. Der Schutz der unmittelbaren Umwelt einer baulichen Anlage gehört zu den wesentlichen Anforderungen der europäischen Bauproduktenrichtlinie [Ri25]. Danach dürfen nur Bauprodukte in Verkehr gebracht werden, wenn die daraus errichteten baulichen Anlagen auch die aus Hygiene, Gesundheits- und Umweltschutz resultierenden Anforderungen erfüllen. In einem Grundlagendokument zur europäischen Bauproduktenrichtlinie [Ri26] werden Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Bauprodukten genannt. Dazu gehören das Freisetzen giftiger Gase, das Vorhandensein gefährlicher Teilchen oder Gase in der Luft, die Emission gefährlicher Strahlen, die Wasser- oder Bodenverunreinigung oder -vergiftung, die unsachgemäße Beseitigung von Abwasser, Rauch, festem oder flüssigen Abfall sowie die Feuchtigkeitsansammlung in Bauteilen und auf deren Oberflächen in Innenräumen. Das Bauordnungsrecht fordert in den Landesbauordnungen, dass bauliche Anlagen so anzuordnen und zu errichten sind, dass insbesondere

Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen nicht gefährdet werden. Zement und mit Zement gebundene Bauprodukte erfüllen die aus den europäischen und nationalen Vorgaben ableitbaren Anforderungen. Die für die Umsetzung dieser Vorgaben geltenden technischen Regelwerke (nationale bzw. harmonisierte europäische Normen) sehen deshalb keine gesonderten Nachweisforderungen zur Feststellung der allgemeinen Brauchbarkeit und damit Umweltverträglichkeit von Zement vor. Zemente und mit zementgebundene Baustoffe, die den nationalen oder später den europäischen Normen entsprechen, erfüllen somit auch die für die allgemeine Verwendbarkeit relevanten Anforderungen an die Umweltverträglichkeit.

Die bisher genannten Festlegungen betreffen die allgemeine Brauchbarkeit von Bauprodukten. Darüber hinaus werden weitergehende Regelungen getroffen, wenn dies für Anwendungen notwendig erscheint, die einen besonderen Schutz der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft verlangen. So werden für Bauprodukte, die in direktem Kontakt mit Grundwasser und Boden stehen, durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) Anforderungen festgelegt, die bei einer bauaufsichtlichen Zulassung entsprechender Bauprodukte zu erfüllen sind (s. Abschnitt II.18.2). Für Werkstoffe im Trinkwasserbereich gelten ebenfalls besondere Anforderungen, die für zementgebundene Werkstoffe in einem Arbeitsblatt des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) festgelegt sind (s. Abschnitt II.18.3). Bauteile aus bewährten Baustoffen wie Mörtel, Putz oder Beton weisen keine oder nur eine unbedeutende Abgabe von Schadstoffen in die (Innenraum-)Luft auf, wie in Abschnitt II.18.4 gezeigt wird. Daher sind in diesem Bereich bislang keine besonderen Regelungen für Zement und übliche zementgebundene Baustoffe vorgesehen.

Über die Betrachtung der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks hinausgehend finden zunehmend auch regionale und glo-

bale Umweltwirkungen stärkere Beachtung. Zu diesen gehören z. B. die Versauerung von Gewässern und Böden oder der Treibhauseffekt. In diesem Fall steht nicht die direkte Gefährdung von Mensch und Umwelt in der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks im Blickpunkt. Vielmehr wird der Gesamtbeitrag zu den regionalen oder globalen Umweltwirkungen betrachtet, der mit dem gesamten Lebensweg eines Bauwerks verbunden ist. Der Lebensweg reicht dabei von der Baustoffherstellung über die Erstellung des Bauwerks und seine Nutzung bis hin zu Abbruch und Entsorgung. Die Methode der Ökobilanz erlaubt die Untersuchung solcher Umweltwirkungen. Auf die Anwendung der Methode wird in Abschnitt II.18.5 eingegangen.

18.2 Boden- und Grundwasserschutz

18.2.1 Rechtliche Vorgaben

Bei Baumaßnahmen in *Grundwasser* und *Boden* sind neben dem Bau- und gegebenenfalls dem Verkehrswegerecht das Wasser- und Bodenschutzrecht zu beachten. Das Wasserhaushaltsgesetz setzt eine Erlaubnis voraus, wenn bei einer Baumaßnahme Stoffe in das *Grundwasser* eingeleitet werden sollen. Eine Erlaubnis wird dann erteilt, wenn durch die Baumaßnahme eine schädliche Verunreinigung des *Grundwassers* oder eine nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodV) haben zum Ziel, bei Einwirkungen auf den Boden Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen so weit wie möglich zu vermeiden. Wasser- und Bodenschutzrecht begründen ihre Maßnahmen bei der Beurteilung von Baumaßnahmen aus dem Vorsorgeprinzip.

Die bauaufsichtliche *Zulassung* von Bauprodukten des Erd- und Grundbaus setzt voraus, dass die aus dem Bau-, dem Wasser- und

Bodenschutzrecht abgeleiteten Anforderungen erfüllt werden. Um diese Anforderungen zusammenfassend beurteilen zu können, wird vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ein „Merkblatt zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" erarbeitet. Die Bewertungsgrundsätze werden unter Beteiligung von Vertretern des Wasser-, Boden- und Abfallsrechts und der Industrie ausgearbeitet. Es ist zu erwarten, dass sie zukünftig als Modell bei rechtsbereichsübergreifenden Festlegungen von technischen Regelwerken im Bereich des Boden- und Grundwasserschutzes herangezogen werden. Deshalb sollen sie hier in ihren Grundzügen vorgestellt werden. Mit der Bewertung von Bauprodukten nach diesen Grundsätzen wird sichergestellt, dass bei deren Einbau und Verwendung die Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung bzw. einer Grundwasserverunreinigung ausgeschlossen werden kann. Die folgenden Ausführungen berücksichtigen den Beratungsstand März 2000 und beschränken sich auf die grundsätzlichen Festlegungen des Merkblatts, das in Detailregelungen noch weiterer Diskussion bedarf. **Bild II.18.2-1** gibt einen Überblick über das Beurteilungs- und Bewertungskonzept.

18.2.2 Beurteilung einer möglichen Boden- und Grundwassergefährdung

Die Beurteilung der Bauprodukte hat zum Ziel, bei deren Einbau und Verwendung eine Gefährdung hinsichtlich *Boden* und *Grundwasser* auszuschließen. Der rechtlich relevante Ort der Beurteilung ergibt sich aus der Lage der Einbaustelle des Bauprodukts im Boden bzw. *Grundwasser*. Wenn wasserdurchlässige Bauprodukte oberhalb des Grundwasserspiegels eingebaut werden, erfolgt die Beurteilung der Immission im Kontaktbereich zwischen Bauprodukt und Bodenkörper. Wenn wasserdurchlässige oder wasserundurchlässige Bauprodukte im Grund-

Rechtsgrundlage

Baurecht	Immissionsschutzrecht	Abfallrecht	Wasserrecht	Bodenschutzrecht
BauPG	BImSchG	KrW-AbfG	WHG	BBodSchG

Schutzziele

Vorsorge gegen schädliche Boden- und Grundwasserverunreinigungen

Beurteilung

Geringfügigkeitsschwellenwerte der Stoffkonzentrationen im Grund- und Sickerwasser (Immissionsgrenzwerte)

Bewertungsablauf für Bauprodukte

Inhaltsstoffe (Herstellerangaben oder Analysen)	Elutionsverhalten (Emissionsverhalten) (standardisierte Prüfverfahren)

Bewertungsmaßstäbe

Inhaltsstoffe	Stoffgehalte im Eluat
Gesetzliche Verwendungsverbote und Verwendungsbeschränkungen Bei Abfallverwertung gilt das LAGA-Regelwerk	Vergleich mit Geringfügigkeitsschwellenwerten im Sicker- bzw. Grundwasser Bewertung der biologischen Parameter bei organischen Stoffen (eventuell)

Bild II.18.2-1: Beurteilungs- und Bewertungskonzept für die Zulassung von Bauprodukten in Kontakt mit Grundwasser und Boden

wasser, also in der gesättigten Zone, eingebaut werden, erfolgt die Beurteilung im Kontaktbereich zwischen Bauprodukt und Grundwasser. Beurteilt werden die im Kontakt mit Boden und Grundwasser stehenden Bauprodukte, nicht deren Ausgangsstoffe.

Für eine schädliche Grundwasserverunreinigung wird es als unerheblich angesehen, ob die Verunreinigung eines Grundwasserelements im weiteren Verlauf der Fließstrecke abgebaut oder durch Vermischung mit nicht verunreinigtem Grundwasser verdünnt wird. Eine Gefährdung von Boden und Grundwasser wird ausgeschlossen, wenn am Ort der Beurteilung die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleitete Werte eingehalten werden. Außerdem dürfen keine relevanten ökotoxikologischen Wirkungen auftreten. Dies kann unterstellt werden, wenn die Immission am Ort der Beurteilung die von der Landesarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) festgelegten Geringfügigkeitsschwellen nicht überschreiten. **Tafel II.18.2-1** zeigt die vorgeschlagenen Geringfügigkeitsschwellenwerte beispielhaft für anorganische Stoffe.

Zeitlich begrenzte Zustände, wie z. B. während der Erhärtung von Frischbeton oder von Zementleiminjektionen, werden im Hinblick auf zulässige Freisetzungsraten am Ort der Beurteilung gesondert betrachtet.

18.2.3 Bewertungskonzept und Bewertungskriterien

Das Bewertungskonzept umfasst zwei Stufen, zum einen die Ermittlung und Bewertung aller relevanten *Inhaltsstoffe* des zu bewertenden Bauprodukts und zum anderen die Ermittlung und Bewertung der davon auslaugbaren *Anteile*.

Die Inhaltsstoffe werden nach folgenden Kriterien bewertet. Verwendungsverbote und Beschränkungen entsprechend der geltenden Chemikalien-Verbotsverordnung müssen eingehalten werden. Kanzerogene, mutagene und teratogene Stoffe dürfen nicht aktiv eingesetzt werden. Stark wassergefährdende Stoffe (WGK3-Stoffe nach der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe – VwVwS) dürfen nur so weit eingesetzt werden, wie eine Freisetzung schädlicher Mengen ausgeschlossen

Tafel II.18.2-1: Geringfügigkeitsschwellen für anorganische Stoffe zur Bewertung von Bauprodukten in Kontakt mit Grundwasser und Boden

Anorganische Parameter	Einheit	Schwellenwert
Antimon (Sb)	µg/l	10
Arsen (As)	µg/l	10
Blei (Pb)	µg/l	25
Cadmium (Cd)	µg/l	5
Chrom, gesamt (Cr)	µg/l	50
Chromat (Cr)	µg/l	8
Kobalt (Co)	µg/l	50
Kupfer (Cu)	µg/l	50
Molybdän (Mo)	µg/l	50
Nickel (Ni)	µg/l	50
Quecksilber (Hg)	µg/l	1
Selen (Se)	µg/l	10
Zink (Zn)	µg/l	500
Zinn (Sn)	µg/l	40
Cyanid, gesamt (CN^-)	µg/l	50
Cyanid, leicht freisetzbar (CN^-)	µg/l	10
Fluorid (F^-)	µg/l	750

werden kann. Mineralische Abfälle als Bestandteile des Bauprodukts müssen den Festlegungen des geltenden Regelwerks der Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [Ri70] entsprechen. Bei der Bewertung der Inhaltsstoffe wird zudem auf

gesicherte Kenntnisse und baupraktische Erfahrungen zurückgegriffen.

Die auslaugbaren Inhaltsstoffe müssen bestimmt und bewertet werden, wenn gesicherte positive Kenntnisse und Erfahrungen diese Untersuchungen nicht überflüssig erscheinen lassen bzw. wenn die Bewertung der Inhaltsstoffe im ersten Schritt nicht bereits zu einem Ausschluss führte. Wasserundurchlässige Bauprodukte, wie z. B. Beton, bedürfen i. d. R. einer Untersuchung nur dann, wenn sie im Grundwasser eingebaut werden, d. h., dass bei allen Gründungskörpern oberhalb des Grundwasserspiegels i. d. R. keine Boden- oder Grundwassergefährdung zu besorgen ist. Liegen keine positiven Erfahrungen vor, müssen wasserdurchlässige Bauprodukte, die vom Sickerwasser durchströmt werden, auch untersucht werden, wenn sie oberhalb des Grundwasserspiegels eingebaut werden. Die auslaugbaren Inhaltsstoffe werden durch *Elutionsverfahren* ermittelt, bei gefügedichtem Beton beispielsweise durch das Trogverfahren [Ri60], bei wasserdurchlässigen Bauprodukten durch Durchströmungsverfahren.

An den gewonnenen Eluaten werden zuerst allgemeine Parameter wie pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Geruch, Färbung, Trübung bzw. Neigung zur Schaumbildung ermittelt und beurteilt. In einem weiteren Schritt werden die stofflichen Parameter, d. h. die im Eluat vorhandenen Inhaltsstoffe analysiert. Diese Inhaltsstoffe dienen als Basis für die Abschätzung der Stoffgehalte am Ort der Beurteilung. Für übliche Rahmenbedingungen ist für diese Abschätzung ein standardisiertes Verfahren im Anhang des Merkblatts vorgesehen. Die Stoffgehalte dürfen am Ort der Beurteilung die Geringfügigkeitsschwellen (s. Tafel II.18.2-1) nicht überschreiten.

Organische Inhaltsstoffe gelten in der Regel als unbedenklich, wenn der Summenparameter TOC (Total Organic Carbon) kleiner gleich 20 mg/*l* ist. Kann die ökotoxikologische Unbedenk-

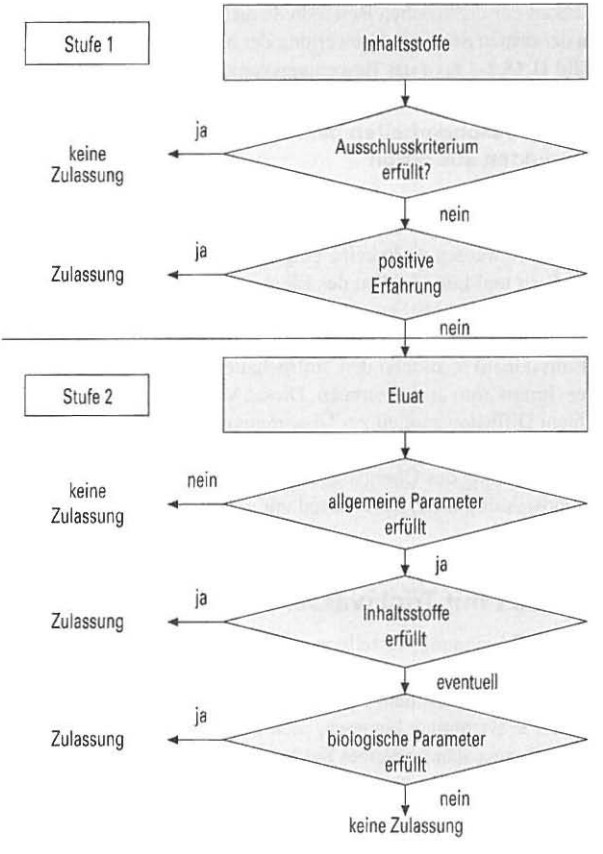


Bild II.18.2-2: Bewertungskonzept für die mobilisierbaren Inhaltsstoffe

lichkeit der organischen Bestandteile nicht belegt werden, erfolgt in der dritten Stufe eine Bewertung der biologischen Parameter. **Bild II.18.2-2** fasst das Bewertungskonzept zusammen.

18.2.4 Besonderheiten bei der Bewertung von Bauprodukten aus Beton

In einem Anhang zum Merkblatt werden besondere Regeln zur Bewertung einzelner Baustoffe getroffen. Für zementgebundene Baustoffe werden darin keine eingrenzenden Anforderungen an pH-Wert und Leitfähigkeit des Eluats gestellt. Für Grundbauwerke aus gefügedichtem Beton wird ein standardisiertes Verfahren zur Abschätzung der aus den Stoffgehalten im Eluat (Emissionen) resultierenden Stoffgehalte im Kontaktgrundwasser (Immission) aufgenommen. Dieses Verfahren beruht auf einem Diffusionsmodell zur Übertragung der Eluatwerte auf die Freisetzung aus realen Baukörpern und einem Transportmodell zur Ermittlung des Übergangs vom Baukörper in das Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung.

18.3 Zementgebundene Bauprodukte im Kontakt mit Trinkwasser

Bei der Gewinnung, Verteilung und Qualität des *Trinkwassers* sind die in Gesetzen und *Technischen Regeln* festgelegten *Anforderungen* zu erfüllen. So dürfen für Werkstoffe, die mit *Trinkwasser* in Berührung kommen, nach § 31 des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes Stoffe nicht verwendet werden, die auf das *Trinkwasser* übergehen können. Hiervon sind nur solche Anteile ausgenommen, die gesundheitlich, geruchlich und geschmacklich unbedenklich sowie technisch unvermeidbar sind.

Die Umsetzung dieser Anforderung für den Trinkwasserbereich erfolgt durch die „Empfehlungen von Kunststoffen und anderen

nichtmetallischen Werkstoffen, die im Trinkwasserbereich angewendet werden können" *(KTW-Empfehlungen)* [Ri68] des ehemaligen Bundesgesundheitsamts. Diese Empfehlungen stellen nach dem jeweiligen Stand der Wissenschaft und Technik fest, unter welchen Bedingungen ein Bedarfsgegenstand aus Kunststoff, der im Trinkwasserbereich Verwendung finden soll, den Anforderungen des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes entspricht.

Die *KTW-Empfehlungen* gelten außer für Kunststoffe auch für andere, nicht metallische Werkstoffe. Aufgrund des abweichenden stofflichen Verhaltens *zementgebundener* Werkstoffe, die sich seit Jahrzehnten in allen Bereichen der Trinkwasserversorgung bewährt haben [Gru9], können die KTW-Empfehlungen für Kunststoffe nicht direkt, z. B. auf Mörtel und Beton, übertragen werden. Deshalb wurde vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) das Arbeitsblatt W 347 „Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung" [Ri64] erstellt, welches das gegenüber Kunststoffen andere Materialverhalten zementgebundener Werkstoffe im Kontakt mit *Trinkwasser* durch entsprechende sachgerechte Prüfbedingungen berücksichtigt. Die Beurteilungsgrundlagen stimmen dabei grundsätzlich mit denen der KTW-Empfehlungen überein.

Das Arbeitsblatt W 347 ist in die in **Tafel II.18.3-1** aufgeführten Anwendungsbereiche unterteilt. Es sieht vor, dass alle genormten oder bauaufsichtlich zugelassenen Zemente verwendet werden können. Dies gilt auch für genormte Zuschläge. Außerdem können *Betonzusatzstoffe* und *Betonzusatzmittel* eingesetzt werden, deren Ausgangsstoffe in einer Positivliste aufgeführt sind, wenn sie außerdem die in **Tafel II.18.3-2** beschriebenen trinkwasserhygienischen *Prüfungen* bestanden haben. Die Positivliste

Tafel II.18.3-1: Anwendungsbereiche für zementgebundene Werkstoffe und Bauteile im Trinkwasserbereich

Anwendungs-bereich	Werkstoffe und Bauteile
I	Zementmörtelauskleidungen für Guss- und Stahlrohre
II	Betonrohre, Betonbehälter, Zementmörtel für Behälterauskleidungen
III	Fliesenkleber, Fugenmörtel, Zementauskleidungen für Formstücke, Reparaturmörtel z. B. für Schweißnähte, Rohwasser-Leitungen
IV	Betonbauteile in Trinkwasserschutzzonen

umfasst dabei alle heute gängigen Grundstoffe für Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel.

Organische Betonzusatzstoffe oder -zusatzmittel sollen nur dann verwendet werden, wenn sie zur Erzielung wichtiger Eigenschaften notwendig sind.

In Abhängigkeit vom vorgesehenen Anwendungsbereich sind die in Tafel II.18.3-2 gezeigten *Erstprüfungen* durchzuführen. Geprüft werden die äußere Beschaffenheit (Klarheit, Färbung, Geruch, Geschmack und die Neigung zur Schaumbildung), TOC-, Arsen-, Blei- und Chromabgabe sowie das mikrobiologische Verhalten. Dabei ist die sechs Monate dauernde mikrobiologische Prüfung [Ri65] nur dann durchzuführen, wenn organische Substanzen gezielt über Betonzusatzstoffe oder Betonzusatzmittel in den Baustoff gelangen.

Die *Prüfungen* erfolgen an Probekörpern, z. B. Normprismen, oder an fertigen Produkten, wie z. B. Rohrabschnitten, bzw.

Tafel II.18.3-2: Einsatzgebiete und Prüfumfang für zementgebundene Werkstoffe und Bauteile im Trinkwasserbereich

durchzuführende Prüfungen	Trinkwasserversorgung	Rohwasserversorgung und Bauteile in Trinkwasserschutzzone I	Bauteile in Trinkwasserschutzzonen II + III
Migrationsprüfungen			
äußere Beschaffenheit	+	+	+
TOC-Abgabe	+	+	–
Arsen-Abgabe[1)]	+	+	+
Blei-Abgabe	+	+	+
Chrom-Abgabe	+	+	+
mikrobiologische Prüfung			
DVGW-Arbeitsblatt W 270[2)] [Ri65]	+	+	–[3)]

Prüfung: +; keine Prüfung: –

[1)] Prüfung nur beim Einsatz von Steinkohlenflugaschen erforderlich

[2)] Prüfung nur beim Einsatz von organischen Zusatzstoffen, Zusatzmitteln oder Bauhilfsstoffen erforderlich

[3)] Prüfung nur für die Mörtelummantelung von Rohren nach DVGW–Arbeitsblatt GW 340 [Ri66] erforderlich, ein Bewuchs ist erlaubt

für die mikrobiologische Prüfung an Platten von mindestens 20 cm × 20 cm × 1 cm. Als eine an den Einsatz im Trinkwasserbereich angepasste Vorlagerung und Vorbehandlung ist eine Lagerung der Mörtel oder Betone entsprechend DIN EN 196-1 bis zum Alter von 28 Tagen vorgesehen, gefolgt von einer Vorcarbonatisierung durch Einlagerung in 0,1 molarer Natriumhydrogencarbonatlösung für 2 × 3,5 Tage und ein 14-tägiges Spülen mit Trinkwasser.

Tafel II.18.3-3: Vorgesehene Oberflächen/Volumen-Verhältnisse für die Anwendungsbereiche I bis IV bei den verschiedenen Prüfungen sowie die Grenzwerte für die Abgabe an gesamtem organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC), an Arsen (As), an Blei (Pb) und an Chrom (Cr)

Anwendungsbereich	Oberflächen/Volumen-Verhältnis bei den verschiedenen Prüfungen [cm^2/cm^3]	
	äußere Beschaffenheit	TOC-, As-, Pb- und Cr-Abgabe
I	1:4	1:1
II	1:4	1:1
III	1:6	1:1
IV	1:50	1:1

Grenzwerte für die verschiedenen Prüfparameter [$mg/(m^2 \cdot d)$]				
	TOC	As[1)]	Pb	Cr
I	2,5	0,05	0,1	0,3
II	10	0,05	0,1	0,3
III	10 (15[2)])	0,05	0,1	0,3
IV	50	0,05	0,1	0,3

[1)] Prüfung nur beim Einsatz von Steinkohlenflugaschen erforderlich

[2)] Fliesenkleber und Fugenmörtel

Die Prüfungen der äußeren Beschaffenheit des Prüfwassers, der TOC-, Arsen-, Blei- und Chromabgabe erfolgen in einem dem Trogversuch ähnlichen Kontaktversuch von 72 Stunden, der

zweimal wiederholt wird. Als Prüfwasser ist eine 0,01 molare Natriumhydrogencarbonatlösung einzusetzen. Die Werte des letzten Versuches, die für die Beurteilung verwendet werden, müssen eine kleinere oder höchstens gleiche Belastung aufweisen wie die der vorhergehenden Versuche. In **Tafel II.18.3-3** sind die vorgesehenen Prüfkörperoberflächen/Prüfwasservolumen-Verhältnisse für die Anwendungsbereiche I bis IV bei den verschiedenen Prüfungen sowie die entsprechenden Grenzwerte zusammengefasst.

Die bei Kunststoffen notwendige Prüfung der Chlorzehrung wurde nicht in das Arbeitsblatt W 347 aufgenommen, da bei zementgebundenen Werkstoffen in dieser Hinsicht keine längerfristigen Probleme aus der Praxis bekannt sind. Auch die Prüfung des pH-Werts und der Aluminiumabgabe sind in dem Arbeitsblatt W 347 nicht vorgesehen, da es sich hierbei um zeitlich begrenzte Effekte handelt, die z. B. bei neu verlegten Leitungen auftreten können, besonders wenn diese mit sehr weichem Trinkwasser betrieben werden.

Die zu beachtenden Einfahrbedingungen für neue Trinkwasserleitungen in Abhängigkeit von den Trinkwassereigenschaften sind in einem Anhang des DVGW-Arbeitsblatts W 346 [Ri63] beschrieben. Wirkungsvolle Maßnahmen, um den pH-Wert und damit gleichzeitig auch die Aluminiumabgabe zu senken, bestehen in einer zumindest in Deutschland durchaus üblichen Aufhärtung von Trinkwasser oder in einer Vorcarbonatisierung frischer Mörteloberflächen, z. B. in ausgeschleuderten Rohren durch CO_2-Druckbeaufschlagung oder durch Einfahren mit hydrogencarbonathaltigen Wässern [Nis2].

Die Erfüllung der im DVGW-Arbeitsblatt festgelegten Anforderungen bestätigt die trinkwasserhygienische Eignung zementgebundener Baustoffe. Praxisbezogene Untersuchungen zeigen, dass alle bewährten Ausführungen auch weiterhin möglich bleiben.

18.4 Einfluss zementgebundener Baustoffe auf die Innenraumluft

Aus Energiespargründen werden immer dichtere Gebäudehüllen mit geringem Luftwechsel erstellt. Aufgrund des geringen Luftaustausches können freigesetzte, evtl. schädliche Substanzen oft nicht ausreichend abtransportiert werden und sich folglich in Innenräumen anreichern. Bauteile aus rein anorganischen, traditionell gebräuchlichen und bewährten Baustoffen, wie Mörtel, Putz, Beton, Stahl und Glas, weisen in der Regel keine oder nur eine unbedeutende Emission von Schadstoffen auf, sodass Gesundheitsbelastungen auszuschließen sind [BMU1, Rüh1].

In Beton können *flüchtige Substanzen* in geringen Mengen über *Betonzusatzstoffe* und *Betonzusatzmittel* vorhanden sein. Im Porengefüge des Zementsteins gehen diese Substanzen, so weit sie nicht in bzw. an den Hydratphasen gebunden werden, in den Gasraum über und werden durch Diffusionsprozesse nach außen transportiert und in sehr geringen Mengen an die Innenraumluft abgegeben. Dabei nimmt die Freisetzungsrate mit zunehmender Dichtheit der Zementsteinmatrix und zunehmendem Feuchtegehalt ab [Hoh1]. Die nachfolgenden Ausführungen zeigen, dass Innenräume durch zementgebundene Baustoffe nicht belastet werden.

Mahlhilfen

Bei der Mahlung sehr feiner Zemente werden zur Verbesserung der Energieausnutzung häufig *Mahlhilfen* in Konzentrationen von weniger als 0,1 M.-% zugesetzt. Dadurch lässt sich die Leistung technischer Mühlen um bis zu 40% steigern [Loc12] und die zur Zementmahlung erforderliche Energie entsprechend senken.

Die wichtigsten Mahlhilfen zur Zementmahlung sind Glykole und Triethanolamin. Diese Substanzen werden beim Mahlen zunächst chemisorptiv am Portlandzementklinker gebunden. Schon nach kurzer Zeit geht die chemisorptive Bindung in eine chemische Bindung über. Von den aufgegebenen Mengen an Mahlhilfen werden die weitaus größten Anteile am Klinkerkorn gebunden [Rec3].

Alle bislang durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die chemisorptiv bzw. chemisch gebundenen Mahlhilfen unter normalen Verarbeitungsbedingungen bei der Herstellung von Mörtel und Beton nicht gasförmig freigesetzt werden können. So ließen sich selbst mit der modernen leistungsfähigen Head-Space-Gaschromatographie in keinem Fall Mahlhilfen im geschlossenen Gasraum über Zementen oder Zementleimen nachweisen [Spa4].

Betonzusatzstoffe

Als *Betonzusatzstoff* nach E DIN 1045-2 eingesetzte Steinkohlenflugaschen aus Kraftwerken enthalten in geringen Mengen anhaftende Ammoniumsalze [Bac2]. In wässrigen alkalischen Medien, wie sie z. B. im Frischbeton gegeben sind, wird *Ammoniak* aus seinen Salzen verdrängt und kann gasförmig freigesetzt werden. Bei Untersuchungen an Estrichen, die in einen fensterlosen Raum gepumpt wurden, sind Flugaschen mit künstlich erhöhten Ammoniumsalzgehalten von 314 mg/kg eingesetzt worden. Dies entspricht einem Mehrfachen der Gehalte in Flugaschen aus ordnungsgemäß betriebenen Kraftwerksanlagen. Auch bei hohen Flugaschegehalten von 123 kg/m³ Frischestrich erreichte die Ammoniumkonzentration in der Raumluft höchstens den niedrigen Geruchsschwellenwert von 3,8 mg/m³ [Koc3]. Der MAK-Wert liegt hingegen bei 31 mg/m³. Bereits nach einem Tag war keine Ammoniakfreisetzung mehr feststellbar.

Neuere Untersuchungen [Spa4] haben diese Ergebnisse bestätigt und gezeigt, dass selbst unter ungünstigen Bedingungen, d. h. bei sehr geringen Luftwechseln, allenfalls eine Geruchsbelästigung durch Ammoniak bei der Verarbeitung auftreten kann. Eine Belästigung oder gar Gefährdung während der wesentlich später beginnenden Nutzungsphase des Bauwerks durch die Ammoniakabgabe von Flugaschen in Mörteln, Estrichen oder Betonen kann ausgeschlossen werden.

Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel können in geringen Mengen flüchtige organische Substanzen enthalten, die in den Gasraum übergehen können. Dabei handelt es sich überwiegend um Spuren von Lösemitteln. Aufgrund der sehr geringen Konzentrationen, in denen sie über Zusatzmittel in Beton eingebracht werden, ist davon auszugehen, dass sie keine Gefährdung oder Belästigung für den Verarbeiter oder den Nutzer von Bauprodukten darstellen [Spa4].

Eine besondere Betrachtung verdient das Formaldehyd wegen seines äußerst geringen MAK-Werts von 0,6 mg Formaldehyd je m^3 Raumluft. Untersuchungen an 40 verschiedenen Betonzusatzmitteln haben ergeben, dass nur sehr geringe oder nicht nachweisbare freie Formaldehydgehalte vorhanden waren [Spa4]. Laborversuche an diesem Zusatzmittel haben gezeigt, dass nur geringe Mengen freigesetzt werden, die Freisetzung nach ein bis zwei Tagen stark abnimmt und im weiteren Verlauf nur noch äußerst geringe Mengen abgegeben werden. Insgesamt beträgt die freigesetzte Formaldehydmenge maximal etwa 30% des im Betonzusatzmittel vorliegenden freien Formaldehyds. Aus der nur kurzfristigen Freisetzung kann gefolgert werden, dass eine Gefährdung während der Nutzung eines Gebäudes durch die Abgabe von Formaldehyd aus zementgebundenen

Baustoffen, die mit formaldehydhaltigen Betonzusatzmitteln hergestellt werden, nicht zu befürchten ist. Dieser Sachverhalt wurde auch durch alle bislang durchgeführten, auf den Arbeitsplatz bezogenen Messungen bestätigt. Diese Messungen haben gezeigt, dass selbst die während des Betonierens gemessenen Formaldehydkonzentrationen deutlich unterhalb des MAK-Werts liegen [DBC1].

Radioaktivität

Alle natürlichen Steine und Erden sowie die daraus hergestellten Baustoffe, wie z. B. Zement und Beton, enthalten geringste Mengen an radioaktiven Stoffen. Beton weist keine höhere Radioaktivität als andere Baustoffe auf; die von Beton ausgehende Strahlung ist im Mittel sogar geringer als die mancher natürlicher Gesteine, wie z. B. Granit oder Basalt. Alle üblichen Betonbaustoffe können aus Sicht des Strahlenschutzes ohne Bedenken im Wohnungsbau eingesetzt werden [Bra1]. Mittelwerte und Spannweiten der spezifischen Aktivitäten der natürlichen Radionuklide Kalium (K-40), Radium (Ra-226) und Thorium (Th-232) sind für einige natürliche Gesteine, für Beton und Betonausgangsstoffe sowie für andere Baumaterialien in der Literatur [Bra1, BMI1 und BMU2] dargestellt.

Auch die Radonexhalation aus Beton ist gering. Sie liegt um zwei Zehnerpotenzen niedriger als die mittlere Radonexhalation natürlicher Böden, die durch die Geologie des Untergrunds vorgegeben wird. So hat sich gezeigt, dass Gebäude mit erhöhten Radonkonzentrationen sich auf Regionen mit erhöhtem Radonpotential im Untergrund konzentrieren, die Quelle der Radonzufuhr mithin im Baugrund liegt [BMU2]. Die Abgabe von *Radon* aus Beton hat dagegen keinen wesentlichen Einfluss auf die Innenraumbelastung. Im Gegenteil, eine Bodenplatte aus Beton

kann den Zustrom von *Radon* aus dem Erdreich entscheidend verringern [BMU2, Kel1]. So konnten in den Bergbaugebieten in den neuen Bundesländern durch Radon belastete Wohngebäude durch entsprechende bauliche Maßnahmen erfolgreich saniert werden.

18.5 Ökobilanzen

Mit einer *Ökobilanz* können umweltrelevante Auswirkungen eines Produkts abgeschätzt werden. Idealerweise wird dabei der gesamte Lebensweg des Produkts betrachtet. Dieser reicht von der Gewinnung der Rohstoffe über seine Herstellung, seine Nutzung bis hin zur Entsorgung am Ende der Nutzung. Zum Beispiel können durch eine ökobilanzielle Betrachtung bei der Planung eines Gebäudes mögliche Umweltwirkungen der Baumaßnahme während des gesamten Lebenswegs erfasst werden.

Die Prinzipien, nach denen eine Ökobilanz zu erstellen ist, sind in der Normreihe ISO 14040 ff festgelegt. Demnach setzt sich eine Ökobilanz aus den vier Bestandteilen Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung zusammen (**Bild II.18.5-1**).

In der Zieldefinition müssen die beabsichtigte Anwendung der Ökobilanzstudie und die Gründe für ihre Durchführung festgelegt sein. Auch die Zielgruppe, d. h. an wen sich die Ergebnisse der Ökobilanz richten soll, muss genannt sein. Zum Untersuchungsrahmen gehört u. a. die Festlegung der so genannten *funktionellen Einheit*, welche den Nutzen und die Leistungsfähigkeit des zu untersuchenden Produktsystems definiert. Beispielsweise kann als funktionelle Einheit eines Anstrichsystems die Oberflächeneinheit festgelegt werden, die für eine bestimmte Zeitspanne geschützt werden soll. Es werden ferner Anforderungen an die Daten und an ihre Qualität sowie an Verfahrensgrund-

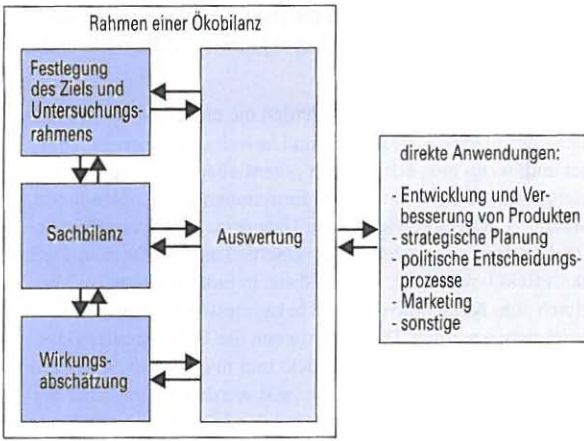


Bild II.18.5-1: Bestandteile einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040)

lagen festgelegt. So müssen u. a. Kriterien festgelegt werden, um zu entscheiden, welche Daten aufgrund ihres geringen Einflusses auf das Ergebnis vernachlässigt werden dürfen.

In dem folgenden Schritt, der so genannten Sachbilanz, werden für das betrachtete System alle Ausgangsmaterialien sowie Zwischen- und Ausgangsprodukte, der dazugehörige Energiebedarf und die damit verbundenen Emissionen und Abfälle zusammengestellt. Dabei sind die so genannten Vorkettenprozesse zu berücksichtigen, d. h. die Aufwendungen für die Bereitstellung des benötigten Stroms oder anderer Energieträger (z. B. Kohle, Erdöl) sowie von Vorprodukten. Alle Daten sollten nach gleichen Bilanzierungsgrundsätzen erhoben werden. Eine solche einheitliche Vorgehensweise ist für den Bereich der Steine-und

Erden-Industrie definiert worden [BSE1] und wird auch auf andere Baustoffe angewandt [Eye1] sowie auf Bauteile und Gebäude erweitert.

In der Wirkungsabschätzung werden die einzelnen Sachbilanzdaten definierten Kategorien von Umweltwirkungen zugeordnet und, wenn möglich, in ihrer potentiellen Wirkung zusammengefasst. So tragen z. B. die Emissionen von Kohlendioxid, Methan, Lachgas sowie anderer Gase zum Treibhauseffekt bei. Da der spezifische Beitrag der verschiedenen Stoffe zum Treibhauseffekt bekannt ist, können diese in ihrer Wirkung im Vergleich zum Kohlendioxid, dem bekanntesten Treibhausgas, beschrieben werden. Dadurch können die Beiträge aller Gase in kg CO_2-Äquivalent ausgedrückt und in einem so genannten Treibhauspotential zusammengefasst werden. In ähnlicher Weise ist eine Zusammenfassung der verschiedenen relevanten Emissionen für den Ozonabbau in der oberen Erdatmosphäre, die Versauerung von Gewässern und Böden, ihre Überdüngung (Eutrophierung) und für die Bildung von Photooxidantien möglich [BSE2]. Letztere sind für die Entstehung von Sommersmog verantwortlich. Man spricht dabei von potentiellen Umweltwirkungen, da die tatsächlich eintretenden Wirkungen z. B. von dem Ort der Emission abhängen, der jedoch in einer Ökobilanz nicht betrachtet wird. Die Ergebnisse einer Wirkungsabschätzung für die Herstellung von Vorprodukten können direkt in die Wirkungsabschätzung für die jeweils untersuchte funktionelle Einheit übernommen werden, wenn einheitliche Bilanzierungsgrundsätze und Berechnungsverfahren zugrunde liegen. Nicht alle Umweltwirkungen lassen sich jedoch durch ein Wirkungspotential beschreiben.

Ökobilanzen im Bauwesen können zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen, z. B. für die Entwicklung und Verbesserung von Bauprodukten, für Bauwerksplanungen oder zur Ver-

besserung von Infrastrukturmaßnahmen von Nutzen sein. Die Anwendung ihrer Ergebnisse liegt jedoch außerhalb des Rahmens einer Ökobilanz und erfordert die genaue Kenntnis der zugrunde liegenden Zusammenhänge.

Entsprechend der Fragestellung müssen Zieldefinition und Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Für die Optimierung der Produktion von Baustoffen, wie z. B. Zement und Beton, bilden diese die funktionelle Einheit. Da lediglich der Herstellungsprozess betrachtet wird, werden die Umweltwirkungen ohne eine weitere Betrachtung des Lebenswegs ermittelt. Für viele Baustoffe sind entsprechende Daten in einem Baustoffprofil zusammengefasst und veröffentlicht [Eye1, BSE2]. In den **Tafeln II.18.5-1 und II.18.5-2** sind Werte für Zement sowie für Beton und Mörtel dargestellt [BSE2]. Aufgeführt werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sowie der Aufwand an Primärenergie, der aus nicht erneuerbaren Energieträgern gedeckt wird. Solche Baustoffprofile können nicht dazu herangezogen werden, um einzelne Baustoffe miteinander zu vergleichen, da diese in der Regel keine vergleichbare Funktion bzw. Leistungsfähigkeit aufweisen.

In die ökologische Bewertung von Bauteilen und Bauwerken bringen Baustoffprofile die mit der Baustoffherstellung verbundenen Umweltwirkungen ein. Dabei kann ein Bauteil oder ein Bauwerk mit definierten Eigenschaften die *funktionelle Einheit* bilden, um z. B. die Herstellung verschiedener Konstruktionsvarianten in einem klar umrissenen Anwendungsfall miteinander vergleichen zu können. Solche Untersuchungen wurden z. B. für Rohrleitungssysteme durchgeführt [Reu1, VDZ5]. Es zeigte sich dabei, dass bei Betrachtung verschiedener Umweltwirkungen häufig keine eindeutige Präferenz einer Konstruktionsvariante möglich ist.

Tafel II.18.5-1: Baustoffprofil Zement

Betrachtetes Produkt:

Zement mit einem mittleren Klinkergehalt von 85 M.-%.
Die Gehalte der verschiedenen Zementbestandteile entsprechen den über die gesamte deutsche Zementproduktion gemittelten Anteilen des Klinkers und der anderen verwendeten Stoffe

Bilanzobjekt:	Zementherstellung
Bezugseinheit:	1 Tonne Zement (85 M.-% Klinkeranteil)
Systemgrenzen:	Input – Ressourcen
	Output – Werktor Zementwerk
Bezugsjahr:	1996

Baustoffprofil Zement		
Auswertung Primärenergie		
Primärenergie nicht erneuerbar	MJ/t	4355

Wirkungsabschätzung		kg/t
Treibhauspotential (GWP)	CO_2-Äq.	872
Ozonabbaupotential (ODP)	R11-Äq.	0,0
Versauerungspotential (AP)	SO_2-Äq.	1,68
Eutrophierungspotential (NP)	PO_4-Äq.	0,20
Photooxidantienpotential (POCP)	C_2H_4-Äq.	0,07

Eine weiterführende Fragestellung liegt in der Betrachtung eines Bauwerks auf seinem Lebensweg. Eine solche Betrachtung ist im Ansatz umfassender und ermöglicht den Zugang zu größeren Optimierungspotentialen. Sie ist allerdings aufwendiger und

Tafel II.18.5-2: Baustoffprofil Transportbeton und Werkfrischmörtel

Betrachtete Produkte:

Zwei Betone (C 25/30 F3 und C 35/40 F3) sowie ein Werkfrischmörtel (Normalmörtel Mg IIa) mit folgenden Zusammensetzungen:

		C 25/30	C 35/40	Mörtel
Zuschlag	kg/m³	1840	1824	1300
Zement	kg/m³	260	360	210
Wasser	kg/m³	185	180	200
Flugasche	kg/m³	80	–	–

Bilanzobjekt: Herstellung Transportbeton und Werkfrischmörtel
Bezugseinheit: 1 m³ Transportbeton oder Werkfrischmörtel
Systemgrenzen: Input – Ressourcen
Output – Werktor Transportbetonwerk
Bezugsjahr: 1995

Baustoffprofil Transportbeton und Werkfrischmörtel

Auswertung Primärenergie		C 25/30	C 35/40	Mörtel
Primärenergie nicht erneuerbar	MJ/m³	1350	1792	1080

Wirkungsabschätzung	kg/m³	C 25/30	C 35/40	Mörtel
Treibhauspotential (GWP)	CO_2-Äq.	241,7	329,4	194,4
Ozonabbaupotential (ODP)	R11-Äq.	0,0	0,0	0,0
Versauerungspotential (AP)	SO_2-Äq.	0,560	0,734	0,443
Eutrophierungspotential (NP)	PO_4-Äq.	0,071	0,091	0,056
Photooxidantienpotential (POCP)	C_2H_4-Äq.	0,035	0,042	0,027

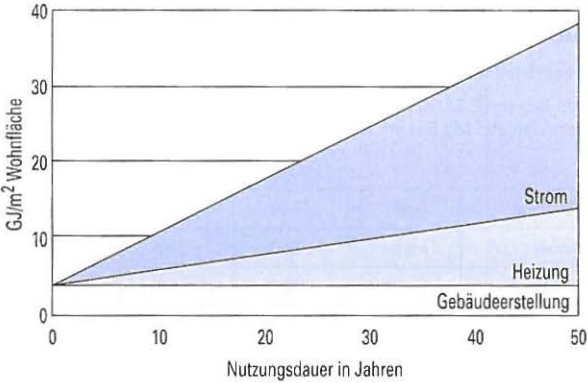


Bild II.18.5-2: Aufwand an Primärenergie (aus nicht erneuerbaren Energieträgern) für die Erstellung eines Mehrfamilienhauses (ohne Installationen sowie ohne bezugsfertige Bearbeitung von Wänden und Fußböden) und seine Nutzung

setzt voraus, dass der Einfluss des betrachteten Bauwerks auf die Umweltwirkungen während der Nutzungsphase erfasst werden kann. **Bild II.18.5-2** zeigt beispielhaft den Aufwand an Primärenergie für die Erstellung eines Mehrfamilienhauses und für seine *Nutzung*, wie es sich aufgrund der Gebäudeausführung und eines typischen Nutzerverhaltens ergibt [VDZ5]. Obgleich es sich bei dem betrachteten Gebäude um ein Niedrigenergiehaus handelt, zeigt sich, dass mit zunehmender Nutzungsdauer der Primärenergieaufwand für Heizung und Strom denjenigen für die Herstellung bei weitem übersteigt. Diese Aussage bleibt auch gültig, wenn beispielsweise der Einbau eines verbesserten Heizungssystems nach einigen Jahren in die Betrachtung einbezogen würde. Ein grundsätzliches Problem liegt bei der öko-

bilanziellen Betrachtung eines Gebäudes darin, dass die Aufwendungen für seine Erstellung bei der Planung zuverlässig erfasst werden können, die Aufwendungen für die Nutzungsphase hingegen lediglich für die erste Zeit einigermaßen sicher abgeschätzt werden können. Eine Gewichtung der Umweltwirkungen infolge Herstellung und Nutzung kann jedoch in der Regel vorgenommen werden.

Bei der Anwendung von Ökobilanzen ist eine korrekte Einordnung ihrer Ergebnisse wichtig [BSE2, BDI1]. Es muss darauf geachtet werden, dass

- die Ökobilanz auch das geeignete Instrument für die jeweilige Fragestellung ist. Lokale bzw. regionale Auswirkungen beispielsweise eines Straßenbaus können besser durch Umweltverträglichkeitsprüfungen untersucht werden. Auch können Gesundheitsaspekte bei der Nutzung von Gebäuden nicht beschrieben werden, da eine Ökobilanz zwar im Prinzip alle Emissionen erfasst, jedoch der konkrete Emissionsort und der Zeitpunkt der Emission nicht betrachtet werden.
- die Ökobilanz keine Aussage darüber gibt, welche der betrachteten Umweltwirkungen am wichtigsten ist. So wird beispielsweise die Entscheidung, wie das ermittelte Treibhauspotential im Vergleich zum Versauerungspotential zu bewerten ist, kaum objektiv zu treffen sein.
- die Ergebnisse grundlegend von der in der Zieldefinition formulierten Fragestellungen abhängig sind. So können die Ergebnisse einer Studie nicht unmittelbar auf ähnliche Fragestellungen übertragen werden, Änderungen der Randbedingungen können die Aussagen deutlich beeinflussen.
- die Ökobilanz immer nur eine Momentaufnahme darstellt.
- Umweltaspekte bei der Entscheidungsfindung nur einen Gesichtspunkt neben technischen, wirtschaftlichen sowie gegebenenfalls soziokulturellen Aspekten darstellen.

Im Bereich des Betonbaus wurden Ökobilanzen zur Analyse der Herstellung der Ausgangsstoffe durchgeführt [Eye1]. Darüber hinausgehende ökobilanzielle Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken wurden in unterschiedlicher Tiefe beispielsweise für Rohre bzw. Rohrleitungssysteme [VDZ5, Jes1, Pas1], (Wohn-)gebäude [Eye1, Jön1], einzelne Bauteile des Hochbaus [Eye1, SIA1], Eisenbahnschwellen [Kün1], Hochspannungsmasten [Kün2], Brückenbauten [Lün1] sowie für Instandsetzungsmaßnahmen [Haa1, Haa2] durchgeführt.

DIN 1164-1

Kapitel III

Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen	DIN 1164-1

Oktober 1994

ICS 91.100.10

Ersatz für
Ausgabe 1990-03 und
DIN 1164-100:1990-03

Deskriptoren: Baustoff, Bindemittel, Zement, Zusammensetzung, Anforderungen, Zementart, Festigkeitsklassen, Normbezeichnung, Lieferung

Cement – Part 1: Composition, specifications
Ciment – Partie 1: Composition, spécifications

Inhalt

		Seite
Vorwort		618
1	**Anwendungsbereich**	620
2	**Normative Verweisungen**	620
3	**Zement**	621
4	**Bestandteile**	623
4.1	Portlandzementklinker (K)	623
4.2	Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) (S)	623
4.3	Puzzolan	624
4.3.1	Allgemeines	624
4.3.2	Natürliches Puzzolan (P)	624
4.4	Flugasche	625
4.4.1	Allgemeines	625
4.4.2	Kieselsäurereiche Flugasche (V)	625
4.5	Gebrannter Schiefer (T)	625
4.6	Kalkstein (L)	626
4.7	Füller (F)	627
4.8	Calciumsulfat	627
4.9	Zementzusatzmittel	628

		Seite
5	**Zementarten, Zusammensetzung und Normbezeichnung**	628
5.1	Zementarten	628
5.2	Zusammensetzung	628
5.3	Normbezeichnung	629
6	**Anforderungen**	632
6.1	Festigkeit	632
6.1.1	Normfestigkeit	632
6.1.2	Anfangsfestigkeit	632
6.2	Erstarren	632
6.3	Raumbeständigkeit	632
6.4	Chemische Anforderungen	632
6.5	Hydratationswärme	633
6.6	Sulfatwiderstand	633
6.7	Wirksamer Alkaligehalt	634
7	**Lieferung**	635
8	**Überwachung (Güteüberwachung)**	636
Anhang A (informativ)	Erläuterungen	637

Vorwort

In dieser Norm DIN 1164-1 sind die Festlegungen der DIN V ENV 197-1 weitgehend und wortgetreu mit der Einschränkung übernommen worden, daß der in der Bundesrepublik Deutschland vorliegende Erfahrungsbereich nicht wesentlich überschritten wurde. So wurden nur diejenigen Bestandteile und Zementarten (Zusammensetzung) entsprechend der Unterteilung und Bezeichnung der DIN V ENV 197-1 übernommen, die bisher genormt oder bauaufsichtlich zugelassen waren. Von der vormals gültigen Norm DIN 1164-1:1990-03 sind die Anforderungen an Zemente mit hohem Sulfatwiderstand oder mit niedriger Hydratationswärme weitgehend übernommen worden, weil es hierfür noch keine Europäischen Normen oder anderweitigen Regelungen gibt. Außerdem sind Anforderungen an Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt aufgenommen worden.

Für die Güteüberwachung und Zertifizierung der Zemente gelten weiterhin sinngemäß die Regelungen der DIN 1164-2 und der „Ergänzenden Richtlinien für die Überwachung (Güteüberwachung) von Zement nach DIN 1164"; eine Überarbeitung dieser Regelungen, bei der auch die sich abzeichnenden europäischen Regelungen berücksichtigt werden, ist eingeleitet worden.

Die in dieser Norm definierten Zemente ermöglichen eine sachgerechte Herstellung von Beton nach DIN 1045 und ENV 206. Die Norm liefert ausreichende Informationen, um Festlegungen über die notwendige Zusammensetzung von dauerhaftem Beton bzw. von Beton mit besonderen Eigenschaften treffen zu können.

Alle Prozentangaben in der Norm sind als Massenanteile in Prozent angegeben.

Anhang A ist informativ.

Änderungen

Gegenüber der Ausgabe März 1990 und DIN 1164-100 : 1990-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

a) Einarbeitung von Regelungen der DIN V ENV 197-1 „Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien – Teil 1: Allgemein gebräuchlicher Zement; Deutsche Fassung ENV 197-1 : 1992".
b) Titel geändert.
c) Aufnahme von Regelungen für NA-Zemente.

Frühere Ausgaben

DIN 1165: 1939-08
DIN 1166: 1939-10
DIN 1167: 1940x-08,1959-07
DIN 1164: 1932-04,1942x-07,1958-12
DIN 1164-1: 1970-06,1978-11,1986-12,1990-03

1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält Anforderungen an die Eigenschaften von Bestandteilen von Zement sowie Angaben über die Zusammensetzung der Anteile, die erforderlich sind, um entsprechende Zementarten und -klassen herzustellen. Sie beinhaltet ferner Festlegungen der mechanischen, physikalischen und chemischen Anforderungen an diese Arten und Klassen.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN 1164-2
Zement – Teil 2: Überwachung (Güteüberwachung)

DIN 1164-8
Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement – Teil 8: Bestimmung der Hydratationswärme mit dem Lösungskalorimeter

DIN 51043
Traß – Anforderungen, Prüfung

DIN EN 196-1
Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1 : 1987 (Stand 1989)

DIN EN 196-2
Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement; Deutsche Fassung EN 196-2 : 1987 (Stand 1989)

DIN EN 196-3
Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:1987

DIN EN 196-6
Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit; Deutsche Fassung EN 196-6:1989

DIN EN 196-21
Prüfverfahren für Zement – Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement; Deutsche Fassung EN 196-21:1989

Ergänzende Richtlinien für die Überwachung (Güteüberwachung) von Zement nach DIN 1164, Fassung September 1981[1)]

AFNOR P 18-592
Granulates – Essai au bleu de méthyléne (Granulate – Methylenblau-Verfahren, (Deutsche Übersetzung))[1)]

ZEMENT-KALK-GIPS 43 (1990), Nr. 8, S. 409–412:
Procedures for the determination of total carbon content (TOC) in limestone
(Verfahren zur Bestimmung des Gesamtgehalts an organischem Kohlenstoff (TOC) in Kalkstein, (Deutsche Übersetzung))[1)]

3 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das heißt, ein anorganischer fein gemahlener Stoff, der, mit Wasser angemacht, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

[1)] Zu beziehen durch: Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin).

Zement nach dieser Norm muß bei entsprechender Dosierung und nach entsprechendem Mischen mit Zuschlag und Wasser Beton oder Mörtel ergeben, der ausreichend lange verarbeitbar und nach einer bestimmten Zeit ein festgelegtes Festigkeitsniveau erreichen und langfristig raumbeständig sein muß.

Die hydraulische Erhärtung von Zement nach dieser Norm beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calciumsilicaten[2], jedoch können auch andere chemische Verbindungen an der Erhärtung beteiligt sein, wie z. B. Aluminate. Der Massenanteil an reaktionsfähigen Calciumoxid (CaO)[3] und Siliciumdioxid (SiO_2)[4] muß in Zementen nach dieser Norm mindestens 50% betragen.

Zement besteht aus einzelnen kleinen Körnern verschiedener Stoffe, jedoch müssen sie hinsichtlich ihrer Zusammensetzung statistisch betrachtet homogen sein. Eine hohe Gleichmäßigkeit aller Zementeigenschaften muß durch eine kontinuierliche Herstellung in großen Massenströmen, insbesondere durch adäquate Mahl- und Homogenisierungsverfahren, erzielt werden. Qualifiziertes und ausgebildetes Personal sowie Einrichtungen für Prüfung, Bewertung und Steuerung der Produktionsqualität sind für die Herstellung von Zementen nach dieser Norm unerläßlich.

---

[2] Es gibt auch Zemente, deren Erhärtung überwiegend auf andere Verbindungen zurückzuführen ist, wie z. B. Calciumaluminate in Tonerdezement.

[3] Als reaktionsfähiges Calciumoxid (CaO) wird nur der Anteil an CaO angesehen, der unter üblichen Erhärtungsbedingungen Calciumsilicathydrate bzw. Calciumaluminathydrate bilden kann. Hierfür wird vom Gesamtanteil des CaO derjenige Anteil abgezogen, der anhand des gemessenen Kohlenstoffdioxid(CO_2)-Anteils als Calciumcarbonat ($CaCO_3$) und anhand des gemessenen Schwefeltrioxid(SO_3)-Anteils als Calciumsulfat ($CaSO_4$) errechnet wird, ohne Berücksichtigung des durch Alkalien gebundenen SO_3.

[4] Reaktionsfähiges Siliciumdioxid (SiO_2) ist als der Anteil an SiO_2 definiert, der nach dem Aufschluß in Salzsäure (HCl) beim Sieden in Kaliumhydroxid(KOH)-Lösung in Lösung geht. Der Anteil an reaktionsfähigem SiO_2 wird bestimmt durch Subtraktion des SiO_2, das im unlöslichen Rückstand (siehe Abschnitt 10 von DIN EN 196-2 : 1990-03) enthalten ist, vom Gesamtanteil an SiO_2 (siehe Abschnitt 13.9 von DIN EN 196-2 : 1990-03), beide im Trockenzustand.

Bei der Zementherstellung und ihrer Steuerung muß sichergestellt sein, daß die Zusammensetzung der Zemente den Grenzwerten, die in dieser Norm festgelegt sind, entspricht.

4 Bestandteile

4.1 Portlandzementklinker (K)

Portlandzementklinker ist ein hydraulischer Stoff, der nach Massenanteilen zu mindestens zwei Dritteln aus Calciumsilicaten ($(CaO)_3 \cdot SiO_2$ und $(CaO)_2 \cdot SiO_2$) bestehen muß. Der Rest enthält Aluminiumoxid (Al_2O_3), Eisenoxid (Fe_2O_3) und andere Verbindungen.

Das Massenverhältnis $(CaO)/(SiO_2)$ muß mindestens 2,0 betragen. Der Massenanteil an Magnesiumoxid (MgO) darf 5,0% nicht überschreiten.

Portlandzementklinker wird durch Brennen mindestens bis zur Sinterung einer genau festgelegten Rohstoffmischung (Rohmehl, Paste oder Rohschlamm) hergestellt, die CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 und geringe Mengen anderer Stoffe enthält. Rohmehl, Paste oder Rohschlamm müssen fein aufgeteilt, innig gemischt und dadurch homogen sein.

4.2 Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) (S)

Hüttensand ist ein latent hydraulischer Stoff, das heißt, er weist bei geeigneter Anregung hydraulische Eigenschaften auf. Er muß nach Massenanteilen mindestens zwei Drittel glasig erstarrte Schlacke enthalten. Der Hüttensand muß nach Massenanteilen zu mindestens zwei Dritteln aus CaO, MgO und SiO_2 bestehen. Der Rest enthält Al_2O_3 und geringe Anteile anderer Verbindungen. Das Massenverhältnis $(CaO + MgO)/(SiO_2)$ muß größer als 1,0 sein.

Hüttensand wird durch schnelles Abkühlen einer Schlackenschmelze geeigneter Zusammensetzung hergestellt, die im Hochofen beim Schmelzen von Eisenerz gebildet wird.

4.3 Puzzolan

4.3.1 Allgemeines

Puzzolane sind natürliche oder industrielle Stoffe, kieselsäurereich oder alumo-silicatisch, oder eine Kombination davon. Obwohl Flugasche puzzolanische Eigenschaften aufweist, wird sie in einem gesonderten Abschnitt (siehe 4.4) behandelt.

Puzzolane erhärten nach dem Anmachen mit Wasser nicht selbständig, sondern reagieren, fein gemahlen und in Gegenwart von Wasser bei üblicher Umgebungstemperatur mit gelöstem Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) unter Entstehung von festigkeitsbildenden Calciumsilicat- und Calciumaluminatverbindungen. Diese Verbindungen sind denen ähnlich, die bei der Erhärtung hydraulischer Stoffe entstehen. Puzzolane müssen im wesentlichen aus reaktionsfähigem SiO_2[4)] und Al_2O_3 bestehen; der Rest enthält Fe_2O_3 und andere Verbindungen. Der Anteil an reaktionsfähigem CaO[3)] ist unbedeutend. Der Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 muß mindestens 25% betragen.

Puzzolane müssen für eine Verwendung als Bestandteile von Zement sachgerecht aufbereitet sein, das heißt, sie müssen je nach Gewinnungs- bzw. Anlieferungszustand ausgewählt, homogenisiert, getrocknet und zerkleinert sein.

4.3.2 Natürliches Puzzolan (P)

Natürliche Puzzolane sind im allgemeinen Stoffe vulkanischen Ursprungs oder Sedimentgestein mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung und müssen 4.3.1 entsprechen.

Zu den natürlichen Puzzolanen gehört Traß nach DIN 51043.

[3)] Siehe Seite 622
[4)] Siehe Seite 622

4.4 Flugasche

4.4.1 Allgemeines

Flugasche kann ihrer Art nach sowohl alumo-silicatisch als auch silicatisch-kalkhaltig sein. Erstere weist puzzolanische Eigenschaften auf; letztere kann zusätzlich hydraulische Eigenschaften aufweisen. Der Glühverlust von Flugasche darf höchstens 5,0% betragen.

Flugasche wird durch die elektrostatische oder mechanische Abscheidung von staubartigen Partikeln aus Rauchgasen von Feuerungen erhalten, die mit feingemahlener Kohle befeuert werden. Asche, die durch andere Verfahren erhalten wird, darf in Zement nach dieser Norm nicht verwendet werden.

4.4.2 Kieselsäurereiche Flugasche (V)

Kieselsäurereiche Flugasche ist ein feinkörniger Staub, hauptsächlich aus kugeligen glasigen Partikeln mit puzzolanischen Eigenschaften. Sie muß im wesentlichen aus reaktionsfähigem SiO_2[4] und Al_2O_3 bestehen. Der Rest enthält Fe_2O_3 und andere Verbindungen. Der Massenanteil an reaktionsfähigem CaO[3] muß unter 5%[5] liegen. Der Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 muß mindestens 25% betragen.

4.5 Gebrannter Schiefer (T)

Gebrannter Schiefer, insbesondere gebrannter Ölschiefer, wird in einem speziellen Ofen bei Temperaturen von etwa 800 °C hergestellt. Aufgrund der Zusammensetzung des natürlichen Ausgangsmaterials und des Herstellungsverfahrens enthält gebrannter Schiefer Klinkerphasen, vor allem Dicalciumsilicat und Monocalciumaluminat sowie neben geringen Mengen an freiem

---

[3] Siehe Seite 622

[4] Siehe Seite 622

[5] Steinkohleflugasche mit einem Gesamtgehalt von weniger als 10% Massenanteil an reaktionsfähigem CaO darf verwendet werden, wenn der Gehalt an freiem Calciumoxid unter 1,5% Massenanteil beträgt.

CaO und Calciumsulfat[6] größere Anteile an puzzolanisch reagierenden Oxiden, insbesondere SiO_2. Dementsprechend weist gebrannter Schiefer in feingemahlenem Zustand ausgeprägte hydraulische Eigenschaften wie Portlandzement und daneben puzzolanische Eigenschaften auf.

Feingemahlener gebrannter Schiefer muß – bei Prüfung nach DIN EN 196-1, mit der in [7] beschriebenen Ausnahme – nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von mindestens 25,0 N/mm² erreichen.

Das Dehnungsmaß für gebrannten Schiefer muß bei Prüfung nach DIN EN 196-3, unter Verwendung einer Mischung mit einem Massenanteil von 30% fein gemahlenem gebranntem Schiefer und mit einem Massenanteil von 70% Referenz-Zement[8], unter 10 mm liegen.

4.6 Kalkstein (L)

Zusätzlich zu den Anforderungen nach 4.7 muß Kalkstein, wenn sein Massenanteil (als Hauptbestandteil) mehr als 5% beträgt, folgende Anforderungen erfüllen:

Kalksteingehalt:	$CaCO_3 \geq 75\%$
Tongehalt:	Methylenblau-Adsorption[9] $\leq 1{,}20$ g/100 g

[6] Überschreitet der SO_3-Gehalt des gebrannten Schiefers den für Zement zulässigen oberen Grenzwert, so ist dies bei der Zementherstellung durch eine Reduzierung der calciumsulfathaltigen Bestandteile entsprechend zu berücksichtigen.

[7] Der Mörtel ist nur mit fein gemahlenem gebranntem Schiefer anstelle von Zement herzustellen. Die Mörtelprismen sind 48 h nach der Herstellung zu entschalen und bis zur Prüfung bei einer relativen Luftfeuchte von mindestens 90% zu lagern.

[8] Referenz-Zement: Ausgewählter Portlandzement (CEM I).

[9] Das Verfahren zur Bestimmung der Methylenblau-Adsorption ist im einzelnen in der französischen experimentellen Norm AFNOR P 18-592 „Granulate; Methylenblau-Verfahren", Dezember 1990, beschrieben. Für diese Prüfung muß der Kalkstein auf eine Mahlfeinheit von etwa 5000 cm²/g (spezifische Oberfläche nach DIN EN 196-6) gemahlen werden.

Gehalt an
organischen
Bestandteilen (TOC)[10]: $\leq 0{,}20\%$

4.7 Füller (F)

Füller sind besonders ausgewählte, natürliche oder künstliche anorganische mineralische Stoffe, die nach entsprechender Aufbereitung aufgrund ihrer Korngrößenverteilung die physikalischen Eigenschaften von Zement (z. B. Verarbeitbarkeit oder Wasserrückhaltevermögen) verbessern. Sie können inert sein oder schwach ausgeprägt hydraulische, latent hydraulische oder puzzolanische Eigenschaften aufweisen. Diesbezüglich werden jedoch keine Anforderungen an sie gestellt.

Füller müssen sachgerecht aufbereitet sein, das heißt, sie müssen je nach Gewinnungs- oder Anlieferungszustand ausgewählt, homogenisiert, getrocknet und zerkleinert sein. Sie dürfen den Wasserbedarf von Zement nicht wesentlich erhöhen sowie die Beständigkeit des Betons oder Mörtels in keiner Weise beeinträchtigen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung herabsetzen.

4.8 Calciumsulfat

Calciumsulfat wird den anderen Bestandteilen des Zements bei seiner Herstellung in geringen Mengen zur Regelung des Erstarrungsverhaltens zugegeben. Calciumsulfat kann Gips (Calciumsulfatdihydrat $CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$), Halbhydrat ($CaSO_4 \cdot 1/2\ H_2O$) oder Anhydrit (kristallwasserfreies Calciumsulfat $CaSO_4$) oder eine Mischung davon sein. Gips und Anhydrit sind als natürliche Stoffe vorhanden. Calciumsulfat fällt auch bei bestimmten industriellen Verfahren an.

---

[10] Das von einer Arbeitsgruppe der European Cement Association (CEMBUREAU) erarbeitete Verfahren zur Bestimmung des Gesamtanteils an organischem Kohlenstoff (TOC = Total Organic Carbon) im Kalkstein ist veröffentlicht in der Zeitschrift ZEMENT-KALK-GIPS 43 (1990), Nr. 8, S. 409–412.

4.9 Zementzusatzmittel

Im Sinne dieser Norm sind Zementzusatzmittel in 4.1 bis 4.8 nicht erfaßte Bestandteile, die zur Verbesserung der Herstellung oder der Eigenschaften von Zement verwendet werden, z. B. Mahlhilfsmittel. Die Gesamtmenge dieser Zusatzmittel sollte einen Massenanteil von 1%, bezogen auf den Zement, nicht überschreiten. Sofern dieser Wert überschritten wird, ist der genaue Wert auf der Verpackung und/oder dem Lieferschein anzugeben.

Diese Zusatzmittel dürfen nicht die Korrosion der Bewehrung fördern oder die Eigenschaften des Zements oder des mit dem Zement hergestellten Betons oder Mörtels nachteilig beeinflussen.

5 Zementarten, Zusammensetzung und Normbezeichnung

5.1 Zementarten

Zemente nach dieser Norm sind in die folgenden drei Hauptarten unterteilt (siehe Tabelle 1):

CEM I Portlandzement
CEM II Portlandkompositzement
CEM III Hochofenzement

5.2 Zusammensetzung

Die Zusammensetzung der Zementarten muß mit den Festlegungen in Tabelle 1 übereinstimmen.

ANMERKUNG: Der Eindeutigkeit halber sind Calciumsulfat (siehe 4.8) und Zementzusatzmittel (siehe 4.9) nicht berücksichtigt. Der gebrauchsfertige Zement besteht aus den Haupt- und Nebenbestandteilen, dem erforderlichen Calciumsulfat und den verwendeten Zementzusatzmitteln.

5.3 Normbezeichnung

Zemente sind mindestens nach der Angabe dieser Norm, der Zementart (Kurzzeichen siehe Tabelle 1) und dem Zahlenwert für die Normfestigkeitsklasse (siehe 6.1.1) zu kennzeichnen. Wenn angegeben werden soll, daß der Zement eine hohe Anfangsfestigkeit aufweist, ist der Buchstabe R anzufügen (siehe 6.1.2).

Zemente mit besonderen Eigenschaften (siehe 6.5, 6.6 und 6.7) erhalten zusätzlich die folgenden Kennbuchstaben:

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

BEISPIEL 1:

Bezeichnung eines Portlandzementes (CEM I), der Festigkeitsklasse 42,5 mit hoher Anfangsfestigkeit (R) nach dieser Norm:

Portlandzement DIN 1164 – CEM I 42,5 R

BEISPIEL 2:

Bezeichnung eines Portlandhüttenzementes, mit 6% bis 20% Hüttensand (CEM II/A-S) der Festigkeitsklasse 32,5 mit üblicher Anfangsfestigkeit nach dieser Norm:

Portlandhüttenzement DIN 1164 – CEM II/A-S 32,5

BEISPIEL 3:

Bezeichnung eines Hochofenzementes, mit 66% bis 80% Hüttensand (CEM III/B), der Festigkeitsklasse 32,5 mit üblicher Anfangsfestigkeit, niedriger Hydratationswärme (NW) und hohem Sulfatwiderstand (HS) nach dieser Norm:

Hochofenzement DIN 1164 – CEM III/B 32,5 – NW/HS

Tabelle 1: Zementarten und Zusammensetzung

Zement-art	Benennung	Kurz-zeichen	Portland-zement-klinker K
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 bis 100
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 bis 94
		CEM II/B-S	65 bis 79
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	80 bis 94
		CEM II/B-P	65 bis 79
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	80 bis 94
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T	80 bis 94
		CEM II/B-T	65 bis 79
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80 bis 94
	Portlandflugasche-hüttenzement	CEM II/B-SV	65 bis 79
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35 bis 64
		CEM III/B	20 bis 34

[1] Die in der Tabelle angegebenen Werte beziehen sich auf die aufgeführten Haupt- und Nebenbestandteile des Zements ohne Calciumsulfat und Zementzusatzmittel.

[2] Nebenbestandteile können Füller sein oder eine oder mehrere Hauptbestandteile, soweit sie nicht Hauptbestandteile des Zements sind.

Massenanteil in Prozent[1)]

Hauptbestandteile					Nebenbestandteile[2)]
Hüttensand S	natürliches Puzzolan P	kieselsäurereiche Flugasche V	gebrannter Schiefer T	Kalkstein L	
–	–	–	–	–	0 bis 5
6 bis 20	–	–	–	–	0 bis 5
21 bis 35	–	–	–	–	0 bis 5
–	6 bis 20	–	–	–	0 bis 5
–	21 bis 35	–	–	–	0 bis 5
–	–	6 bis 20	–	–	0 bis 5
–	–	–	6 bis 20	–	0 bis 5
–	–	–	21 bis 35	–	0 bis 5
–	–	–	–	6 bis 20	0 bis 5
10 bis 20	–	10 bis 20	–	–	0 bis 5
36 bis 65	–	–	–	–	0 bis 5
66 bis 80	–	–	–	–	0 bis 5

6 Anforderungen

6.1 Festigkeit

6.1.1 Normfestigkeit

Die Normfestigkeit von Zement ist die 28-Tage-Druckfestigkeit, bestimmt nach DIN EN 196-1. Sie muß den Anforderungen nach Tabelle 2 genügen.

Es werden drei Festigkeitsklassen unterschieden: Klasse 32,5, Klasse 42,5 und Klasse 52,5 (siehe Tabelle 2).

6.1.2 Anfangsfestigkeit

Die Anfangsfestigkeit von Zement ist die Druckfestigkeit nach 2 Tagen oder 7 Tagen, bestimmt nach DIN EN 196-1. Sie muß den Anforderungen nach Tabelle 2 genügen.

Für jede Klasse der Normfestigkeit sind zwei Klassen für die Anfangsfestigkeit definiert, eine Klasse mit üblicher Anfangsfestigkeit und eine Klasse mit hoher Anfangsfestigkeit, gekennzeichnet mit R (siehe Tabelle 2).

6.2 Erstarren

Die nach DIN EN 196-3 ermittelten Erstarrungszeiten müssen für alle Zementarten und Festigkeitsklassen die Anforderungen nach Tabelle 2 erfüllen.

6.3 Raumbeständigkeit

Das nach DIN EN 196-3 ermittelte Dehnungsmaß muß für alle Zementarten und Festigkeitsklassen die Anforderungen nach Tabelle 2 erfüllen.

6.4 Chemische Anforderungen

Die Eigenschaften der Zemente der Zementart und Festigkeitsklasse in Tabelle 3, Spalten 3 bzw. 4, müssen bei Prüfung nach den in Spalte 2 angegebenen Normen den in Tabelle 3, Spalte 5 geforderten Werten entsprechen.

Tabelle 2: Mechanische und physikalische Anforderungen

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit N/mm²				Erstarrungsbeginn	Erstarrungsende	Dehnungsmaß
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit				
	2 Tage	7 Tage	28 Tage		min	h	mm
32,5	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60	≤ 12	≤ 10
32,5 R	≥ 10	–					
42,5	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5			
42,5 R	≥ 20	–					
52,5	≥ 20	–	≥ 52,5	–	≥ 45		
52,5 R	≥ 30	–					

6.5 Hydratationswärme

Zement NW mit niedriger Hydratationswärme darf bei der Bestimmung nach dem Lösungswärme-Verfahren nach DIN 1164-8 in den ersten 7 Tagen eine Wärmemenge von höchstens 270 J je g Zement entwickeln.

6.6 Sulfatwiderstand

Als Zement HS mit hohem Sulfatwiderstand gelten 6.6.1 und 6.6.2.

6.6.1 Portlandzement CEM I mit einem rechnerischen Gehalt an Tricalciumaluminat C_3A[11] von höchstens 3% und mit einem Gehalt an Aluminiumoxid Al_2O_3 von höchstens 5%.

6.6.2 Hochofenzement CEM III/B

[11] Der Gehalt an Tricalciumaluminat wird als Massenanteil in % aus der chemischen Analyse nach der Gleichung

$$C_3A = 2{,}65 \cdot Al_2O_3 - 1{,}69 \cdot Fe_2O_3$$

errechnet.

Tabelle 3: Chemische Anforderungen

1	2	3	4	5
Eigenschaft	Prüfung nach	Zementart	Festigkeits-klasse	Anforderung
Glühverlust	DIN EN 196-2	CEM I CEM III	alle	≤ 5,0%
Unlöslicher Rückstand	DIN EN 196-2	CEM I CEM III	alle	≤ 5,0%
Sulfatgehalt (als SO_3)	DIN EN 196-2	CEM I CEM II[1)]	32,5 32,5 R 42,5	≤ 3,5%
			42,5 R 52,5 52,5 R	≤ 4,0%
		CEM III	alle	
Chlorid-gehalt	DIN EN 196-21	alle	alle	≤ 0,10%

[1)] Diese Angabe gilt für alle Zementarten CEM II/A und CEM II/B einschließlich Portlandkompositzemente mit nur einem Hauptbestandteil, z. B. CEM II/A-S, außer CEM II/B-T, der in allen Festigkeitsklassen bis 4,5% SO_3 enthalten darf.

6.7 Wirksamer Alkaligehalt

Als Zement NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt gelten 6.7.1 bis 6.7.3.

6.7.1 Zement nach dieser Norm mit einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 0,60% Na_2O-Äquivalent.

6.7.2 Hochofenzement CEM III/A mit mindestens 50% Hüttensand und einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 1,10% Na_2O-Äquivalent.

6.7.3 Hochofenzement CEM III/B mit einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 2,00% Na_2O-Äquivalent.

Tabelle 4: Kennfarben für die Festigkeitsklassen

Festigkeitsklasse	Kennfarbe	Farbe des Aufdrucks
32,5	hellbraun	schwarz
32,5 R		rot
42,5	grün	schwarz
42,5 R		rot
52,5	rot	schwarz
52,5 R		weiß

7 Lieferung

Zement darf nur in saubere und von Rückständen früherer Lieferungen freie Transportbehälter gefüllt werden. Er darf auch während des Transports nicht verunreinigt werden.

Säcke bzw. Lieferscheine müssen mit folgenden Angaben versehen sein:

- Normbezeichnung nach 5.3
- Lieferwerk und gegebenenfalls weitere Angaben
- Kennzeichen für die Überwachung
- Gewicht: Brutto-Gewicht des Sackes[12)] oder Netto-Gewicht des losen Zements

Die Lieferscheine für losen Zement außerdem mit:

- Tag und Stunde der Lieferung,
- amtlichem Kennzeichen des Fahrzeugs,
- Auftraggeber, Auftragsnummer und Empfänger.

[12)] Das Brutto-Gewicht eines gefüllten Zementsackes beträgt 25 kg. In technischer Hinsicht, z. B. bei der Nutzung des angegebenen Sackgewichts als Abmeßgröße, können Abweichungen von diesem Brutto-Gewicht bis 2% nicht beanstandet werden.

Die Kennfarbe der Säcke für Zement und die Farbe des Aufdrucks sind in Tabelle 4 festgelegt.

8 Überwachung (Güteüberwachung)

Die Einhaltung der nach den Abschnitten 5 und 6 geforderten Zusammensetzungen und Eigenschaften des Zements ist durch Eigen- und Fremdüberwachung (Überwachung nach DIN 1164-2) nachzuprüfen. Die Durchführung der Überwachung und die Kennzeichnung überwachter Zemente richtet sich nach DIN 1164-2 und den zugehörigen "Ergänzenden Richtlinien für die Überwachung (Güteüberwachung) von Zement nach DIN 1164".

Anhang A (informativ)

Erläuterungen

Zu Abschnitt 4.9 Zementzusatzmittel:

Zementzusatzmittel im Sinne dieser Norm werden zur Verbesserung der Herstellung von Zement oder der Eigenschaften von Zement verwendet. Mit Zementzusatzmitteln modifizierte bautechnische Eigenschaften von Zement sollen durch eine Zusatzbezeichnung kenntlich gemacht werden. Zusatzmittel zur Verbesserung oder Veränderung der Eigenschaften von Frischbeton und Festbeton – die sogenannten Betonzusatzmittel – werden in dieser Norm nicht behandelt.

Zementzusatzmittel dürfen die Korrosion der Bewehrung nicht fördern; sie dürfen daher Chloride, Thiocyanate, Nitrate, Nitrite und Formiate als Wirkstoff nicht enthalten. Elektrochemische Prüfungen zum Nachweis hierfür dürfen nur von solchen Prüfstellen durchgeführt werden, die im Rahmen der Prüfzeichenprüfung von Betonzusatzmitteln für diese Prüfungen bauaufsichtlich bestimmt sind.

Zementzusatzmittel dürfen darüber hinaus nicht die Eigenschaften des mit dem Zement hergestellten Betons oder Mörtels sowie den Korrosionsschutz der Bewehrung nachteilig beeinflussen. Zemente mit Wirkstoffen, bei denen man dies nicht unterstellen kann, sind nicht Gegenstand dieser Norm. Solche Wirkstoffe dürfen als Zementzusatzmittel nicht ohne entsprechende Nachweise, wie z. B. eine bauaufsichtliche Zulassung des damit hergestellten Zements, verwendet werden.

Zu Abschnitt 5.2 Zusammensetzung:

Die aus der DIN V ENV 197-1 übernommenen Zemente entsprechen im wesentlichen folgenden in Tabelle A.1 bisher genormten oder bauaufsichtlich zugelassenen Zementen:

Tabelle A.1: Gegenüberstellung neuer und alter Zementbezeichnungen

neu	alt
Portlandzement (CEM I)	Portlandzement (PZ)
Portlandhüttenzement (CEM II/A-S, CEM II/B-S)	Eisenportlandzement (EPZ)
Portlandpuzzolanzement (CEM II/A-P, CEM II/B-P)	Traßzement (TrZ)
Portlandflugaschezement (CEM II/A-V)	Flugaschezement (FAZ)
Portlandölschieferzement (CEM II/A-T, CEM II/B-T)	Portlandölschieferzement (PÖZ)
Portlandkalksteinzement (CEM II/A-L)	Portlandkalksteinzement (PKZ)
Portlandflugaschehüttenzement (CEM II/B-SV)	Flugaschehüttenzement (FAHZ)
Hochofenzement (CEM III/A, CEM III/B)	Hochofenzement (HOZ)

Zu Abschnitt 6.1 Festigkeit:

Die aus der DIN V ENV 197-1 übernommenen Festigkeitsklassen entsprechen im wesentlichen folgenden in Tabelle A.2 bisher genormten bzw. im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen festgelegten Festigkeitsklassen:

Tabelle A.2: Gegenüberstellung neuer und alter Festigkeitsklassen

neu	alt
32,5	Z 35 L
32,5 R	Z 35 F
42,5	Z 45 L
42,5 R	Z 45 F
52,5	Z 55 L
52,5 R	Z 55

Zu Abschnitt 8 Überwachung:

Die DIN 1164-2 und die "Ergänzende Richtlinien für die Überwachung (Güteüberwachung) von Zement nach DIN 1164" werden derzeit überarbeitet. Dabei sind insbesondere die neuen Regelungen dieser Norm sowie der DIN V ENV 197-1 und des europäischen Verfahrens zur Beurteilung der Konformität des Zements (vorgesehen als ENV 197-2) zu berücksichtigen.

Internationale Patentklassifikation

G 01 N 033/38 C 04 B 007/02 C 04 B 007/12 C 04 B 011/00

Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen Änderung 1	DIN 1164-1/A1

Januar 1999

ICS 91.100.10

Änderung von
DIN 1164-1:1994-10

Deskriptoren: Zement, Zusammensetzung, Anforderung

Cement – Part 1: Composition, specifications; Amendment 1

Ciment – Partie 1: Composition, spécifications; Amendment 1

Im Abschnitt 6.7 "Wirksamer Alkaligehalt" lautet der erste Absatz wie folgt:

"Als NA-Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt gelten 6.7.1 bis 6.7.5."

Die folgenden Abschnitte sind zu ergänzen:

"6.7.4 Portlandhüttenzement CEM II/B-S mit einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 0,70% Na_2O-Äquivalent

6.7.5 Hochofenzement CEM III/A mit höchstens 49% Hüttensand und einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 0,95% NaO-Äquivalent."

Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Anhang

Kapitel IV

1 Literaturverzeichnis

In alphabetischer Reihenfolge der Literaturkurzbezeichnungen

[ACI1] *Preplaced aggregate concrete for structural and mass concrete*
In: American Concrete Institute: Proceedings 66 (1969) 10, S. 785–797

[Ait1] Aitken, A.; Taylor, H. F.:
Steam curing of cement and cement-quartz pastes
In: Chemistry of cement: Proceedings of the fourth international symposium (Washington 1960). – Washington: U.S. Government Printing Office, 1962. – (National Bureau of Standards Monograph; 43), S. 285–290

[Alb1] Albeck, J.; Kirchner, G.:
Einfluß der Verfahrenstechnik auf die Herstellung marktorientierter Zemente
In: Zement-Kalk-Gips 46 (1993) 10, S. 615–626

[Ale1] Alexanderson, J.:
Physikalische Wirkungen bei der Warmbehandlung von Beton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 38 (1972) 12, S. 885–887

[Alf1] Alfes, C.; Schießl, P.:
Verwendung von künstlichen Puzzolanen als Zusatzstoff im Beton: Phase 1 – Grundsätze der Wirksamkeit – Teil B Silicastaub. – Stuttgart: IRB, 1993. – (IRB-Forschungsbericht T 2686/2)

[Bac1] Bacsa, E.:
Schleuderbeton – Herstellung und Verwendung im Hoch- und Tiefbau
In: Zement und Beton 23 (1978) 2/3, S. 86–92

[Bac2] Backes, H.-P.; Koch, H.-J.:
Eigenschaften von Beton mit NH_3-befrachteter Steinkohlenflugasche
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 54 (1988) 3, S. 71–76

[Bam1] Bamforth, P. B.; Al-Isa, M.:
Modelling of degradation: Project No. BE95-1347. – Brüssel: Brite Euram, 1998

[Bas1] Basalla, A.:
Wärmeentwicklung im Beton
In: Zement-Taschenbuch 1964/65 / Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.). – Wiesbaden: Bauverl., 1963, S. 275–304

[Bay1] Bayer, E.; Kampen, R.:
Beton-Praxis: Ein Leitfaden für die Baustelle. – 8. Aufl. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1999. – (Schriftenreihe der Bauberatung Zement). – ISBN 3-7640-0392-8

[Baz1] Bazant, Z. P.; Kim, J.-K.:
Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 2: Basic creep
In: Materials and Structures/Matériaux et Constructions 24 (1991) 144, S. 409–421

[Baz2] Bazant, Z. P.; Kim, J.-K.:
Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 3 – Creep at drying
In: Materials and Structures/Matériaux et Constructions 25 (1992) 145, S. 21–28

[Baz3] Bazant, Z. P.:
Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method
In: American Concrete Institute: Proceedings 69 (1972) 4, S. 212–217

[BDI1] *Die Durchführung von Ökobilanzen zur Information von Öffentlichkeit und Politik: Eine Orientierungshilfe für den Umgang mit Ökobilanzen in Unternehmen und Verbänden* / Bundesverband der Deutschen Industrie, BDI (Hrsg.). – Köln: Industrieförderung GmbH, 1999. – (BDI-Drucksache 313). – ISSN 0407-8977

[Bed1] Beddoe, R.; Springenschmid, R.:
Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton
In: Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999) 4, S. 158–166

[Bee1] Beer, W.:
Gleitschalungsbau mit Portlandkalksteinzement: Bau eines Klinkersilos
In: Beton 48 (1998) 10, S. 604–608

[BGB1] *Güteschutz-Jahrbuch 1999: mit Bericht über die Tätigkeit des Bund Güteschutz Beton- und Stahlbetonfertigteile e.V. für das Jahr 1998* / Bund Güteschutz Beton- u. Stahlbetonfertigteile, BGB (Hrsg.). – Bonn: BGB, 1999. – (Güteschutz-Jahrbuch 1999)

[BGR1] *Regeln für den Einsatz von Hautschutz: Ausgabe April 1994* / Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, HVBG (Hrsg.). – 1994. – (ZH 1/708)

[Blü1] Blümel, O.W.; Springenschmid, R.:
Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton
In: Straßen- und Tiefbau 24 (1970) 2, S. 92–98

[BMI1] *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 1978* / Bundesminister des Innern, BMI (Hrsg.). – Bonn: BMI, 1981

[BMU1] *Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen* / Bundesminister f. Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit, BMU (Hrsg.). – Bonn: BMU, 1992. – (Umweltpolitik)

[BMU2] *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1998* / Bundesminister f. Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit, BMU (Hrsg.). – Bonn: BMU, 1999. – (Umweltpolitik). – ISBN 0533-9456

[Bon1] Bonzel, J.:
Beton bestimmter Festigkeit
In: Zement-Taschenbuch 1984 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). – 48. Ausg. – Wiesbaden: Bauverl., 1984. – ISBN 3-7625-1491-7, S. 227–260

[Bon2] Bonzel, J.; Dahms, J.:
Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons
In: Beton 16 (1966) 7, S. 299–305; 8, S. 341–342

[Bon3] Bonzel, J.; Walz, K.:
Über den Zusammenhang zwischen Griffigkeit, Abnutzbarkeit, Betonzusammensetzung und Herstellung von Betonfahrbahnen
In: Straßen- und Tiefbau 22 (1968) 10, S. 761–768

[Bon4] Bonzel, J.:
Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons
In: Beton 16 (1966) 9, S. 379–383; 10, S. 417–421

[Bon5] Bonzel, J.; Manns, W.:
Beurteilung der Betondruckfestigkeit mit Hilfe der Annahmekennlinien
In: Beton 19 (1969) 7, S. 303–307; 8, S. 355–360

[Bon6] Bonzel, J.; Krell, J.:
Konsistenzprüfung von Frischbeton
In: Beton 34 (1984) 2, S. 61–66; 3, S. 101–104

[Bot1] Bothe, H.; Handke, D.; Kümper, H.-J.:
Herstellung einer Versatzwand aus unbewehrtem Spritzbeton für das geplante Endlager Konrad
In: Bauingenieur 72 (1997) 1, S. 41–45

[Bra1] Brandt, J.; Rechenberg, W.:
Umwelt, Radioaktivität und Beton: Sachstandsbericht. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1994. – ISBN 3-7640-0325-1

[Bra1] Brandt, J.; Moritz, H.:
Bauphysik nach Maß: Planungshilfen für Hochbauten aus Beton. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1995. – (Schriftenreihe der Bauberatung Zement). – ISBN 3-7640-0345-6

[Bre1] Breit, W.:
Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton. – Aachen: Verl. d. Augustinus Buchhandlung, 1997. – (Aachener Beiträge zur Bauforschung 8). – ISBN 3-86073-136-X. Zugl.: Aachen, RWTH, Diss.

[Bre2] Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H. W.:
Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch besondere Auswahl von Zementen und Betonzusätzen
In: Beton-Informationen 32 (1992) 1, S. 10–15

[Bre3] Brem, G.; Wooge, M.:
Potsdamer Platz Berlin: Ausführung dichter Baugruben mit rückverankerten Unterwasserbetonsohlen
In: Bauingenieur 72 (1997) 1, S. 53–59

[Bre4] Breitschuh, K.:
Industrieböden aus vacuumiertem Stahlbeton
In: Berliner Bauwirtschaft (1990) 12, S. 240–242

[Bre5] Breitenbücher, R.:
Recycling von Frisch- und Festbeton: Ressourcenschonende und wirtschaftliche Wiederverwertung von Beton
In: Beton 44 (1994) 9, S. 510–514

[Bre6] Breitenbücher, R.:
Güterüberwachungssystem von gestern – morgen noch zeitgemäß?: Entwicklungen und Konsequenzen
In: Beton 49 (1999) 9, S. 492–497

[Bro1] Brodersen, H. A.:
Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins.
Aachen, RWTH, Diss., 1982

[Bru1] Brux, G.; Bacsa, E.:
Schleuderbeton: Herstellung und Verwendung im Hoch- und Tiefbau. (Nach einem Vortrag von Bacsa, E. am 31. Mai 1978 auf dem Österreichischen Betontag, Bad Ischl)
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 45 (1979) 1, S. 43–45

[Bru2] Brux, G.:
Vacuum-Concrete-Verfahren und Anwendungsgebiete. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1966

[BSE1] *Baustoff-Ökobilanzen: Leitfaden zur Erstellung von Sachbilanzen in Betrieben der Steine-Erden-Industrie* / Bundesverband Steine und Erden, BSE (Hrsg.). – Frankfurt/M.: BSE, 1997

[BSE2] *Baustoff-Ökobilanzen: Wirkungsabschätzung und Auswertung in der Steine-Erden-Industrie* / Bundesverband Steine und Erden, BSE (Hrsg.). – Frankfurt/M.: BSE, 1999

[BTB1] *Informationsaustausch zwischen Werken der Zementindustrie und Werken der Transportbetonindustrie: Abschlußbericht; Fassung Juli 1994* / Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie, BTB; Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). – Duisburg (u. a.): BTB (u. a.), 1994

[Bun1] Bunke, N.:
Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. – Berlin: Beuth, 1991. – (DAfStb: Schriftenreihe 422). – ISBN 3-410-65622-7

[Bun2] Bunke, N.:
Erläuterungen zur Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restbeton, Restmörtel und Restwasser (Restwasser-Richtlinie)
In: Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992) 10, S. 254–257

[Byf1] Byfors, K.:
Chloride binding in cement paste
In: Nordic Concrete Research / Nordic Concrete Association (Hrsg.). – Oslo: Norske Betongforening, 1986. – (Nordic Concrete Research 5), S. 27–38

[CEB1] *Concrete under multiaxial states of stress: Constitutive equations for practical design; synthesis report; contribution à la 23e session plenière du C.E.B., Prague, Octobre 1983* / <prepared by>: General Task Group 6 Comite Euro-International du Beton, CEB; <Reporter>: Eibl, J. (u. a.). – Paris Lausanne: CEB, 1983. – (Comité Euro-International du Béton: Bulletin d'information 156)

[Cha1] Chartschenko, I. J.; Volke, K.; Stark, J.:
Untersuchungen über den Einfluß des pH-Wertes auf die Ettringitbildung
In: Hochsch. f. Architektur u. Bauwesen Weimar: Wiss. Zeitschr. (Ausg. A) 39 (1993) 3, S. 253–258

[Con1] *Underwater concreting: Report of the working party on underwater concreting set up within Concrete Society* / Concrete Society (Hrsg.). – London: Concrete Society, 1971. – (Concrete Society Technical Report Cement and Concrete Association: Publication TRCS 3 52.018)

[CUR1] *Gewapend onderwaterbeton* / Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR (Hrsg.). – Zoetermeer: Betonvereniging, 1981. – (CUR-VB rapport 102). – ISBN 90-212-6031-X

[CUR2] *Onderwaterbeton* / Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR (Hrsg.). – Zoetermeer: Betonvereniging, 1972. – (CUR-rapport 56)

[CUR3] *Surface properties of concrete roads in accordance with traffic safety and reduction of noise: BRITE/EURAM Project BE 3415: Final technical report* / Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR (u. a.) (Hrsg.). – Gouda: CUR, 1994

[Cur4] Curbach, M.; Fuchs, H.; Hegger, J. (u. a.):
Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. – Berlin: Beuth, 1995. – (DAfStb: Schriftenreihe 488). – ISBN 3-410-65688-X

[D'An1] D'Ans, J.; Eick, H.:
Das System CaO-Al_2O_3-$CaSO_4$-H_2O bei 20 °C
In: Zement-Kalk-Gips 6 (1953) 9, S. 302–311

[DAf1] *Festschrift 75 Jahre Deutscher Ausschuß für Stahlbeton* / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Ernst, 1982. – (DAfStb: Schriftenreihe 333). – ISBN 3-433-00934-1

[Dah1] Dahms, J.:
Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons
In: Beton 18 (1968) 9, S. 361–365

[Dah2] Dahms, J.; Wischers, G.:
Untersuchungen zur Beherrschung von Temperaturrissen in Brückenwiderlagern durch Raum- und Scheinfugen
In: Beton 18 (1968) 11, S. 439–442; 12, S. 483–490

[Dah3] Dahms, J.:
Betonförderung durch lange Fallrohrleitungen im Schachtbau
In: Beton 12 (1962) 12, S. 565–570

[Dah4] Dahms, J.:
Beton hoher Frühfestigkeit
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 40 (1974) 6, S. 402–408

[Dar1] Darr, E.; Schaaf, B.:
Betriebserprobung Feste Fahrbahn zwischen Mannheim und Karlsruhe
In: Eisenbahntechnische Rundschau 45 (1996) 12, S. 772–782

[DBC1] *Betonzusatzmittel und Umwelt: Sachstandsbericht Mai 1999* / Deutsche Bauchemie (Hrsg.). – 3. Ausg. – Frankfurt/M.: Deutsche Bauchemie, 1999. – ISBN 3-87382-036-1

[DBV1] *Welt des Betons: 75 Jahre Deutscher Beton-Verein e.V.* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Wiesbaden: DBV, 1973

[DBV2] *Chloride im Beton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996. – Wiesbaden: DBV, 1996. – (DBV-Sachstandbericht)

[DBV3] *Sachstandbericht „Massenbeton"*
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 329, 1982, S. 3–9

[Det1] Dettling, H.:
Die Wärmedehnung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone. Stuttgart, TH, Diss., 1961

[Deu1] *Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn: Stand: 15. 10. 1995* / Deutsche Bahn (Hrsg.). – 3. Aufl. – Berlin: Deutsche Bahn, 1995

[Dhi1] Dhir, R.K.; Hewlett, P. C.; Chan, Y. N.:
Near-surface characteristics of concrete: Abrasion resistance
In: Materials and Structures/Matériaux et Constructions 24 (1991) S. 122–128

[Dia1] Dialer, C.; Lanig, N.; Stöckl, S.; Zelger, C.:
Versuche zur Methode der Verformungsmessung an dreiachsig beanspruchten Betonwürfeln
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe: H. 447, 1995, S. 107–123

[Die1] Diederichs, U.; Jumppanen, U.-M.; Penttala, V.:
Behaviour of high strength concrete at high temperatures. – Helsinki: Univ. of Technology Helsinki, 1989. – (Helsinki University of Technology, Dep. of Structural Engineering: Report 92)

[Dok1] Dokenwald, K. H.:
Bau eines Hochhauses in Gleitbauweise am Beispiel des Torhauses der Messe Frankfurt
In: Vorträge auf dem Deutschen Betontag 1987: vom 23. bis 25. April 1987 in Berlin / Deutscher Beton-Verein (Hrsg.). – Wiesbaden: DBV, 1988, S. 383–396

[Dro1] Droese, S.:
Gebrochenes Korn im Gleitschalungsbau: Verwendung von Splitt als Betonzuschlag
In: Beton 40 (1990) 9, S. 377–382

[Dub1] Dubsky, M.; Tschopp, E.:
Expansionsmörtel, eine Alternative zum herkömmlichen Sprengstoff
In: Schweizer Ingenieur und Architekt 104 (1986) 47, S. 1207–1211

[Dum1] Dum, T.:
Bau eiförmiger Faulbehälter in Singapur: Gleitschalungsbau für komplexe Geometrie
In: Beton 49 (1999) 3, S. 141–144

[Ebe1] Ebeling, K.:
Planungs- und Ausführungshinweise: Der Aufgabenbereich des Betoningenieurs
In: Beton 48 (1998) 4, S. 208–214

[Edv1] Edvardsen, C.:
Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete
In: ACI Materials Journal 96 (1999) 4, S. 448–454

[Ege1] Eger, W.:
Betonstraßen mit besonderen Eigenschaften in Norwegen und Schweden
In: Straße und Autobahn 49 (1998) 5, S. 237–244

[Eic1] Eickschen, E.; Siebel, E.:
Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton
In: Beton 48 (1998) 9, S. 580–586; 10, S. 641–646

[Eic2] Eichler, K.:
Umweltfreundlicher Spritzbeton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 60 (1994) 5, S. 108–112

[Eic3] Eickschen, E.:
Tragschichten aus mit hydraulischen Bindemitteln gebundenem teerhaltigen Asphaltgranulat
In: Verbundvorhaben: Einsatz von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau: Ergebnisse eines Status-Seminars am 2. und 3. 12. 1993 in der Ruhr-Universität Bochum / Umweltbundesamt, UBA (Hrsg.). – Berlin: UBA, 1994, S. 147–160

[Eic4] Eickschen, E.; Siebel, E.:
Drain-HGT als wasserdurchlässige Tragschicht im Verkehrswegebau: Technologische Untersuchungen
In: Straße und Autobahn 45 (1994) 4, S. 193–199

[Eic5] Eickschen, E.; Siebel, E.:
Dauerhaftigkeit von Dränbeton für Betonfahrbahndecken. – Bonn: Bundesdruckerei, 1998. – (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 764)

[Eic6] Eickschen, E.; Siebel, E.:
Verwendung von Betonbrechsand als Zuschlag für Betonfahrbahndecken
In: Straße und Autobahn 49 (1998) 9, S. 494–505

[Eis1] Eisenmann, O.:
Grundlagen der Temperaturberechnungen des frischen und erhärtenden Betons
In: Beton-Informationen (1970) 3, S. 36–41

[Ell1] Ellerbrock, H.-G.; Mathiak, A.:
Zerkleinerungstechnik und Energiewirtschaft
In: Zement-Kalk-Gips 47 (1994) 9, S. 524–534

[Ell2] Ellerbrock, H.-G.:
Gutbett-Walzenmühlen
In: Zement-Kalk-Gips 47 (1994) 2, S. 75–82

[Ell3] Ellerbrock, H.-G.; Sprung, S.; Kuhlmann, K.:
Einfluß von Zumahlstoffen auf die Eigenschaften von Zement
In: Zement-Kalk-Gips 38 (1985) 10, S.586-588

[Eye1] Eyerer, P.; Reinhardt, H.-W.:
Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung. – Basel: Birkhäuser, i. Dr.

[Fag1]. Fagerlund, G.:
The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete
In: Materials and Structures/Matériaux et Constructions 10 (1977) 58, S. 217–229

[Fei1] Feige, F.:
Die Wälzmühle: Technischer Stand und Entwicklungsmöglichkeiten
In: Zement-Kalk-Gips 46 (1993) 8, S. 451–456

[FIZ1] *Verwendung von CEM II-Zementen im Betonbau* / Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – Düsseldorf: FIZ, 1999

[Fle1] Fleischer, W.:
Einfluß des Zements auf Schwinden und Quellen von Beton. – München: Baustoffinstitut der TU München, 1992. – (Berichte aus dem Baustoffinstitut der TU München Jan 92). – ISSN 0940-886X

[Fle2] Fleischer, W.:
Können die Anforderungen an die Griffigkeit bei Neubau und Instandsetzung von Fahrbahndecken aus Beton gewährleistet werden?
In: Straße und Autobahn 46 (1995) 3, S. 137–143

[Fre1] Frey, R.; Reinhardt, H.-W.:
Untersuchung der Dichtigkeit von Vakuumbeton gegenüber wassergefährdenen Flüssigkeiten
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 445, 1994, S. 109–142

[Fri1] Friede, H.:
Zur Beurteilung des Angriffs kalklösender Kohlensäure auf Beton.
Aachen, RWTH, Diss., 1983

[Fri2] Friesenborg, B.; Genenger, R.; Orlowski, F.:
Resthetonrecycling: Recycling of waste concrete
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 50 (1984) 12, S. 830–836

[Gaj1] Gajewski, S.; Hoenig, V.:
Einflüsse von Brenner und Brennstoff auf den Betrieb und die NO_x-Emission von Drehrohröfen der Zementindustrie
In: Zement-Kalk-Gips 47 (1994) 8, S. 462–466

[Geh1] Gehlen, C.:
Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Aachen, RWTH, Diss., 2000

[Geh2] Gehlen, C.:
Neues Konzept für die Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen
In: Beiträge zum 36. Forschungskolloquium des DAfStB am 8. und 9. Oktober 1998 an der Rheinisch-Westfälischen-Technischen Hochschule Aachen (DAfStb-Forschungskolloquium: 36. Aachen, 8.–9. 10. 1998) / RWTH Aachen, Inst. f. Massivbau; RWTH Aachen, Inst. f. Bauforschung (Hrsg.). – Aachen: RWTH Aachen, 1998. – (DAfStb-Forschungskolloquium 36), S. 186–193

[Ger1] Gerwick, B. C.:
Underwater concrete construction
In: Mechanical engineering 94 (1972) 11, S. 29–34

[Ger2] Gerwick, B. C.:
Placement of tremie concrete
In: Symposium on concrete construction in aqueous environments: A symposium of 10 papers... (Concrete construction in aqueous environments Seattle 28.–29. 9. 1962) / American Concrete Institute, ACI (Hrsg.). – Detroit, Mi.: ACI, 1964, S. 9–20

[Ger3] Gerike, K.:
Die Wirkung einer Vakuumbehandlung auf die Betoneigenschaften
In: Beton 25 (1975) 5, S. 166–169

[Gho1] Ghorab, H. Y.; Ludwig, U.:
Modellversuche zur Klärung von Schadensursachen an wärmebehandelten Betonfertigteilen: Teil 1: Zur Stabilität von Monophasen und Ettringiten
In: TIZ-Fachberichte 105 (1981) 9, S. 634–640

[Grä1] Gräf, H.; Grube, H.:
Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser
In: Beton 36 (1986) 5, S. 184–187; 6, S. 222–226

[Grä2] Gräf, H.; Thielen, G.:
Betontechnologische Einflüsse auf Beginn und Fortschritt von Stahlkorrosion im Beton
In: Beton 45 (1995) 9, S. 640–646

[Grä3] Gräf, H.; Grube, H.:
Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit: Teil 2
In: Beton 36 (1986) 12, S. 473–476

[Grü1] Grübl, P.:
Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe
In: Beton 31 (1981) 2, S. 54–58

[Grü2] Grübl, P.:
Europäisches Konzept zur Nachbehandlung von Beton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 62 (1996) 10, S. 83–91

[Gru1] Grube, H.:
Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton: Konstruktion und Ausführung wasserundurchlässiger Bauwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, die abdichtende und statische Funktionen zugleich haben. – Darmstadt: Elsner, 1982. – (Bauphysik für die Praxis). – ISBN 3-87199-063-9

[Gru2] Grube, H.; Rickert, J.:
Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton
In: Beton 49 (1999) 4, S. 239–244

[Gru3] Grube, H.:
Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1991. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 52). – ISBN 3-7640-0294-8

[Gru4] Grube, H.; Hintzen, W.:
Prüfung zur Voraussage der Temperaturerhöhung im Beton infolge Hydratationswärme des Zements: Teil 1
In: Beton 43 (1993) 5, S. 230–234

[Gru5] Grube, H.; Rechenberg, W.:
Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer: Teil 1
In: Beton 37 (1987) 11, S. 446–451

[Gru6] Grube, H.; Rechenberg, W.:
Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer: Teil 2
In: Beton 37 (1987) 12, S. 495–498

[Gru7] Grube, H.:
Unterwasserbeton
In: Zement-Taschenbuch 1979/80 / Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.). – 47. Ausg. – Wiesbaden: Bauverl., 1979. – ISBN 3-7625-0903-4, S. 423–451

[Gru8] Grube, H.; Kern, E.; Quitmann, H.-D.:
Instandhaltung von Betonbauwerken
In: Beton-Kalender: Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer; Teil II / Franz, Gotthard (Schriftl.). – Berlin: Ernst & Sohn, 1990. ISBN 3-433-01108-7, S. 681–805

[Gru9] Grube, H.; Spanka, G.:
Zementgebundene Baustoffe im Trinkwasserbereich. Anlagen zur Wasserversorgung
In: Beton 48 (1998) 6, S. 342–348

[Gun1] Gunkel, P.:
Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente
In: Beton-Informationen 23 (1983) 1, S. 3–8

[Guo1] Guo, Z.; Zhou, Y.; Nechvatal, D.:
Auswertung von Versuchen zur mehrachsigen Betonfestigkeit, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 447, 1995, S. 65–106

[Haa1] Haag, C.; Gerdes, A.; Künniger, T.; Richter, K.; Wittmann, F. H.:
Ökologische Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonteils
In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997) S. 167–191

[Haa2] Haag, C.; Gerdes, A.; Wittmann, F. H.:
Hydrophobierung des Betons: Ökologische und ökonomische Aspekte
In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997) S. 293–314

[Hac1] Hackelsberger, C.:
Beton – Stein der Weisen? Nachdenken über einen Baustoff. – Braunschweig: Vieweg, 1988. – ISBN 3-528-08779-X

[Hae1] Haegermann, G.:
Die Geschichte der drei Zementvereine bis zu ihrem Zusammenschluß
In: Vorträge auf der ordentlichen Mitgliederversammlung am 20. Mai 1949 in Düsseldorf / Verein Deutscher Portland- und Hüttenzementwerke. – Düsseldorf: Verein Deutscher Portland- und Hüttenzementwerke, 1949, S. 3–11

[Hae2] Haegermann, G.; Huberti, G.; Möll, H.:
Vom Caementum zum Spannbeton: Band 1. – Wiesbaden: Bauverl., 1964

[Han1] Hanke, V.; Siebel, E.:
Erweiterte Grundlagen für die Betonzusammensetzung
In: Beton 45 (1995) 6, S. 412–418

[Han2] Hansson, C. M.; Strunge, H.; Markussen, J. B.; Frolund, T.:
The effect of cement type on the diffusion of chloride
In: Nordic Concrete Research 4 / Nordic Concrete Federation. Oslo, 1985. ISSN 0800-6377, S. 70–80

[Här1] Härdtl, R.:
Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften. – Berlin (u. a.): Beuth, 1995. – (DAfStb: Schriftenreihe 448). – ISBN 3-410-65648-0

[Hei1] Heinz, D.; Ludwig, U.; Nasr, R.:
Modellversuche zur Klärung von Schadensursachen an wärmebehandelten Betonfertigteilen: Teil 2: Wärmebehandlung von Mörteln und späte Ettringitbildung
In: TIZ-Fachberichte 106 (1982) 3, S. 178–183

[Her1] Herr, R.; Wieker, W.; Winkler, W.:
Chemische Untersuchungen der Porenlösung im Beton: Schlußfolgerungen für die Praxis
In: Bauforschung – Baupraxis 216, S. 45–51

[Her2] Herr, R.:
Größtes Kohlesilo Europas in Gleitschalungsbauweise
In: Beton-Informationen 37 (1997) 2, S. 19–21

[Hil1] Hilsdorf, H.K.; Reinhardt, H.-W.:
Beton
In: Beton-Kalender 1999: Teil 1; Taschenbuch für Beton,- Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer / Eibl, Josef (Schriftl.). – Berlin: Ernst u. Sohn, 1999. ISBN 3-433-01424-8, S. 1–156

[Hil2] Hillemeier, B.; Stenner, R.; Flohrer, C.; Polster, H.; Buchenau, G.:
Instandsetzung und Erhaltung von Betonbauwerken
In: Beton-Kalender 1999: Teil 2; Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer / Eibl, Josef (Schriftl.). – Berlin: Ernst & Sohn, 1999. ISBN 3-433-01424-8, S. 595–720

[Hil3] Hillen, H. F.:
Van onderwaterbeton naar beton onder water
In: Cement (niederl.) 22 (1970) 7, S. 298–305

[Hin1] Hintzen, W.:
Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1998. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 59). – ISBN 3-7640-0382-0. Zugl.: Aachen, RWTH, Diss.

[Hin2] Hintzen, W.; Grube, H.:
Verminderung der Rißbildung in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton
In: Betonbau in Forschung und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von György Iványi . – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1999. – ISBN 3-7640-0384-7, S. 177–184.

[Hin3] Hintzen, W.; Thielen, G.:
Betontechnische Einflüsse auf die Rißbildung infolge Hydratationswärme
In: Beton 49 (1999) 10, S. 595–599; 11, S. 655–658

[Hoe1] Hoenig, V.; Sylla, H.-M.:
Technische Klinkerkühlung unter Berücksichtigung der Zementeigenschaften
In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998) 6, S. 318–333

[Hoh1] Hohberg, I.; Müller, C.; Schießl, P.; Volland, G.:
Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe: Sachstandsbericht. – Berlin: Beuth, 1996. – (DAfStb: Schriftenreihe 458). – ISBN 3-410-65658-8

[Hub1] Huber, H.:
Schnellmethode zur Prüfung einer gleichmäßigen Wärmeentwicklung von Zementen
In: Zement und Beton 33 (1988) 3, S. 162–163

[Hus1] *8. International Symposium on Concrete Roads: Theme V: Safety and Environment (International Symposium on Concrete Roads: 8, Lisbon, 13.–16. 9. 1998)* / Cembureau; Associacao Tecnica da Industria de Cimento, ATIC; Association Mondiale de la Route (Hrsg.). – Lisbon: ATIC, 1998. – ISBN 2-906078-26-3

[Jes1] Jeschar, R.; Specht, E.; Steinbrück, A.:
Umweltbeeinflussung bei der Herstellung von Abwasserrohren aus verschiedenen Werkstoffen
In: Korrespondenz Abwasser 43 (1996) 1, S. 61–70

[Joh1] Johansen, V.; Thaulow, N.:
Heat curing and late formation of ettringite
In: ACI Spring Convention (Seattle 1997). – Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1997

[Jön1] Jönsson, A.; Björklund, T.; Tillmann, A.-M.:
LCA of concrete and steel building frames
In: International Journal of Life Cycle Assessment 3 (1998) 4, S. 216–224

[Jon1] Jones, F. E.:
The quaternary system CaO-Al_2O_3-$CaSO_4$-H_2O at 25 °C
In: Journal of Physical Chemistry 48 (1944) S. 311–356

[Kal1] Kalousek, G. L.:
The reactions of cement hydration at elevated temperatures
In: Proceedings of the third International Symposium on the Chemistry of Cement (London 1952) / Cement and Concrete Association (Hrsg.). – London: Cement and Concrete Assoc., 1954, S. 334–355

[Kei1] Keil, F.:
Hochofenschlacke. – 2. Aufl. – Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1963. – (Stahleisen-Bücher 7)

[Kei2] Keil, F.:
Zement: Herstellung und Eigenschaften. – Berlin: Springer, 1971. – ISBN 3-540-05167-8

[Kel1] Keller, G.:
Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Baustoffe unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen
In: VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994) 8, S. 717–720

[Kel1] Kelham, S.:
Effect of cement composition and hydration temperatures on volume stability of mortar
In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement: Volume 4: Performance and durability of cementitious materials (International Congress on the Chemistry of Cement: 10, Göteborg, 2.–6. 6. 1997) / Justnes, Harald (Hrsg.). – Göteborg: Amarkai AB Congrex Göteborg AB, 1997. – ISBN 91-630-5498-1, 060-8

[Ker1] Kern, E.; Hegger, J.:
19 000 m³ Beton für Fundamentplatte in einem Arbeitsvorgang eingebracht
In: Beton-Informationen 31 (1991) 5, S. 51–53

[Ker2] Kerkhoff, B.; Siebel, E.:
Einfluß von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton. – Berlin: Beuth, i. Vorber. – (DAfStb: Schriftenreihe)

[Kie1] Kietzmann, M.; Bäumer, W.; Bien, E.; Lubach, D.:
Anmerkungen zu hautirritierenden Wirkungen von Zement
In: Dermatosen in Beruf und Umwelt 47 (1999) 5, S. 184–189

[Kir1] Kirchartz, B.:
Reaktion und Abscheidung von Spurenelementen beim Brennen des Zementklinkers. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1994. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 56). – ISBN 3-7640-0333-2. Zugl.: Aachen, RWTH, Diss.

[Kir2] Kirchner, G.:
Reaktionen des Cadmiums beim Klinkerbrennprozeß
In: Zement-Kalk-Gips 38 (1985) 9, S. 535–539

[Kir3] Kirchner, G.:
Thalliumkreisläufe und Thalliumemissionen beim Brennen von Zementklinker
In: Zement-Kalk-Gips 40 (1987) 3, S. 134–144

[Kla1] *Weit spannt sich der Bogen: Die Geschichte der Bauunternehmung 1865–1955* / Dyckerhoff & Widmann (Hrsg.). – Darmstadt: Archiv f. Wirtschaftskunde, 1955

[Kla2] Klawa, N.; Haack, A.:
Tiefbaufugen: Fugen- und Fugenkonstruktionen im Beton- und Stahlbetonbau. – Berlin: Ernst u. Sohn, 1990. – ISBN 3-433-01012-9

[Klo1] Klopfer, H.:
Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen. – Wiesbaden: Bauverl., 1974. – ISBN 3-7625-0383-4

[Knö1] Knöfel, D.; Böttger, K. G.:
Zum Verhalten von zementgebundenen Baustoffen in SO_2- angereicherter Atmosphäre
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 51 (1985) 2, S. 107–114

[Koc1] Koch, A.; Steinegger, H.:
Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff
In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960) 7, S. 317–324

[Koc2] Koch, H.-J.; Lutze, D.:
Sonderbeton für Fundamentplatten: Genehmigung im Einzelfall für das Kraftwerk Schkopau
In: Beton 45 (1995) 4, S. 227–233

[Koc3] Koch, H.-J.; Prenzel, H.:
Versuche über Geruchsentwicklungen beim Frischestrich mit NH_3-befrachteter Flugasche
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 55 (1989) 11, S. 72–75

[Koe1] Koelliker, E.:
Über die Wirkung von Wasser und wäßriger Kohlensäure auf Beton
In: Werkstoffeigenschaften und Bausanierung, 1983, S. 195–200

[Kol1] Kollmann, H.; Strübel, G.; Trost, F.:
Mineralsynthetische Untersuchungen zu Treibursachen durch Ca-Al-Sulfat-Hydrat und Ca-Si-Carbonat-Sulfat-Hydrat
In: Tonindustrie-Zeitung 101 (1977) 3, S. 63–70

[Kön1] König, R.; Wagner, J. P.:
Mikrosilica: Baustoff aus der Zukunft. – Darmstadt: Woermann, 1999

[Kön2] König, G.; Soukhov, D.; Jungwirth, F.:
Sichere Betonproduktion: Betondruckfestigkeit nach prEN 206 und EC 1/EC 2
In: Beton 48 (1998) 11, S. 680–688

[Kor1] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.:
Beton Brandschutz Handbuch. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1999. – ISBN 3-7640-0380-4

[Kor2] Schneider, U.; Kordina, K.:
Zum mechanischen Verhalten von Normalbeton unter instationärer Wärmebeanspruchung
In: Beton 25 (1975) 1, S. 19–25

[Kor3] Kordina, K.:
Grundlagen für den Entwurf von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit bestimmter Feuerwiderstandsdauer
In: Stahlbetonbau: Berichte aus Forschung und Praxis; Herbert Rüsch gewidmet zum 65. Geburtstag / Knittel, Georg Kupfer, Herbert (Hrsg.). – Berlin: Ernst, 1969, S. 119–138

[Kot1] Kottkamp, K.; Lehmann, K.:
Beton mit niedriger Wärmeentwicklung für große Fundamente
In: Beton-Informationen 32 (1992) 6, S. 71–76

[Krä1] Krämer, H.; Lehmann, W. S.:
Die natürlichen Zuschlagstoffe für Beton und Betonwerkstein. – Wiesbaden: Bauverl., 1956

[Kre1] Krell, J.; Wischers, G.:
Einfluß der Feinststoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit: Teil 1
In: Beton 38 (1988) 9, S. 356–359

[Kre2] Krell, J.; Wischers, G.:
Einfluß der Feinststoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit: Teil 2
In: Beton 38 (1988) 10, S. 401–404

[Kri1] Krieger, B.; Sulten, P.:
Stand der Entwicklung von lärmarmen Betondecken
In: Strasse und Autobahn 50 (1999) 9, S. 479–486

[Kro1] Kropp, J.:
Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Karlsruhe, Univ., Diss., 1983

[Kuh1] Kuhlmann, K.; Schneider, M.; Söllenböhmer, F.:
PCDD/F-Emissions from German Cement Clinker Kilns
In: Dioxin '96 16th Symposium on chlorinated dioxins and related compounds: Formation & Sources, Analysis, Quality Control;

Short papers (Dioxin '96/ Symposium on Chlorinated Dioxins and Related Compounds: 16, Amsterdam, 12.–16. 8. 1996) / Olie, K. (u. a.) (Hrsg.). – Amsterdam: Univ. of Amsterdam, 1996. – (Organohalogen Compounds 27). – ISBN 3-928379-49-6, S. 78–83

[Küh1] Kühling, G.; Petscharnig, F.:
Zusatzmittel für Unterwasserbeton: Einflüsse und Anwendungen
In: Beton 41 (1991) 8, S. 371–373

[Kuh2] Kuhlmann, K.; Ellerbrock, H.-G.; Sprung, S.:
Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement: Teil 1: Festigkeit von Portlandzement
In: Zement-Kalk-Gips 38 (1985) 4, S. 169–178

[Kün1] Künniger, T.; Richter, K.:
Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz: Streckenschwellen aus vorgespanntem Beton, Profilstahl und teerölimprägniertem Buchenholz. – Dübendorf: Eidgen. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, 1998. – (Eidgen. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Abteilung 115: Forschungs- und Arbeitsberichte 115/38)

[Kün2] Künniger, T.; Richter, K.:
Ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armiertem Beton und korrosionsgeschütztem Stahl. – Dübendorf: Eidgen. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, 1995

[Kun1] Kunterding, R.:
Beanspruchung der Oberfläche von Stahlbetonsilos durch Schüttgüter. – Karlsruhe: Inst. f. Massivbau u. Baustofftechnologie, 1991. – (Inst. f. Massivbau u. Baustofftechnologie: Schriftenreihe 12)

[Kup1] Kupfer, H.:
Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Belastung
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 229, 1973, S. 1–105

[Lam1] Lamprecht, H.-O.:
Opus Caementitium: Bautechnik der Römer. – 4. verb. u. erw. Aufl. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1993. – ISBN 3-7640-0310-3

[Lam2] *Beton Lexikon* / Lamprecht, H.-O.; Kind-Barkauskas, F.; Wolf, H. (Hrsg.). – Düsseldorf: Beton-Verl., 1990. – ISBN 3-7640-0275-1

[Lan1] Lang, E.:
Die Bestimmung des „C-Werts"
In: Beton-Informationen 37 (1997) 3, S. 46–47

[Law1] Lawrence, C. D.:
Mortar expansions due to delayed ettringite formation effects of curing period and temperature
In: Cement and Concrete Research 25 (1995) 4, S. 903–914

[Law2] Lawrence, C. D.:
Transport of oxygen through concrete: To be presented at The British Ceramic Society meeting "Chemistry and chemically-related properties of cement", London, 12–13 April 1984, 18 S.

[Lei1] Leißner, J.; Weber, J. W.:
Realkalisierung von Stahlbetonbauteilen, die mit Spritzbeton instandgesetzt wurden, unter Praxisbedingungen. – Stuttgart: IRB, 1994. – (IRB-Forschungsbericht T 2696)

[Li 1] Li, S.; Roy, D. M.:
Investigation of relations between porosity, pore structure, and Cl-diffusion of fly ash and blended cement pastes
In: Cement and Concrete Research 16 (1986) 5, S. 749–759

[Lin1] Linder, R.; Beitzel, H.:
Pumpbeton und Betonpumpen – Anforderungen und Baustellenerfahrungen: Ein Überblick
In: Beton- und Stahlbetonbau 78 (1983) 3, S. 62–68

[Loc1] Locher, F. W.:
Zement: Grundlagen und Anwendung. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, i. Dr.

[Loc2] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.:
Erstarren von Zement: Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung
In: Zement-Kalk-Gips 29 (1976) 10, S. 435–442

[Loc3] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.; Rechenberg, W.:
Erstarren von Zement: Teil 4: Einfluß der Lösungszusammensetzung
In: Zement-Kalk-Gips 36 (1983) 4, S. 224–231

[Loc4] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.:
Erstarren von Zement: Teil 2: Einfluß des Calciumsulfatzusatzes
In: Zement-Kalk-Gips 33 (1980) 6, S. 271–277

[Loc5] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.; Sylla, H.-M.:
Erstarren von Zement: Teil 3: Einfluß der Klinkerherstellung
In: Zement-Kalk-Gips 35 (1982) 12, S. 669–676

[Loc6] Locher, F.W.; Wischers, G.:
Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins
In: Zement-Taschenbuch 1974/75 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). – Wiesbaden: Bauverl., 1974, S. 45–60

[Loc7] Locher, F. W.:
Sulfatwiderstand von Zement und seine Prüfung
In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998) 7, S. 388–398

[Loc8] Locher, F.W.; Rechenberg, W.; Sprung, S.:
Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure
In: Beton 34 (1984) 5, S. 193–198

[Loc9] Locher, F.W.; Sprung, S.:
Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton: Influence on the alkali-silica reaction in concrete
In: Zement-Kalk-Gips 28 (1975) 4, S. 162–169

[Loc10] Locher, F.W.; Sprung, S.:
Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion
In: Beton 23 (1973) 7, S. 303–306; 8, S. 349–353.

[Loc11] Locher, F.W.; Sprung, S.:
Einwirkung von salzsäurehaltigen PVC-Brandgasen auf Beton
In: Beton 20 (1970) 2, S. 63–65

[Loc12] Locher, F.W.; Seebach, H.M. von:
Einfluß der Sorption auf die technische Zerkleinerung
In: Eigenschaften, Erzeugung, Prüfung und Behandlung feiner Teilchen: 5. Tagung über d. Gebiet feiner Teilchen vom 2. Apr. 1970. – Essen: Vulkan-Verl., 1970. – (Haus der Technik: Vortragsveröffentlichungen.; 247), S. 32–43

[Loh1] Lohmeyer, G.:
Beton-Technik: Handbuch für betongerechte Planung und Ausführung. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1997. – ISBN 3-7640-0363-4

[Loh2] Lohmeyer, G. C.:
Weiße Wanne, einfach und sicher: Konstruktion und Ausführung von Kellern und Becken aus Beton ohne besondere Dichtungsschicht. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1985. – ISBN 3-7640-0207-7

[Lud1] Ludwig, U.:
Über die Einflußnahme verschiedener Sulfate auf das Erstarren und Erhärten von Zementen
In: Zement-Kalk-Gips 21 (1968) 2, S. 81–90; 3, S. 109–119; 4, S. 175–180

[Lud2] Ludwig, U.:
50 Jahre Institut für Gesteinshüttenkunde – 26 Jahre Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Bindemittel
In: TIZ-Fachberichte 102 (1978) 5, 272–284

[Lud3] Ludwig, H.-M.:
Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton. – Weimar: Hochschule f. Architektur u. Bauwesen Weimar, 1996

[Lün1] Lünser, H.:
Ökobilanzen im Brückenbau: Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. – Basel: Birkhäuser, 1999. – (Baupraxis). – ISBN 3-7643-5946-3

[Lun1] Lunk, P.:
Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton. – Freiburg: Aedificatio Verl., 1997. – (Building Materials Reports 8). – ISBN 3-99905088-24-X

[Lus1] Lusche, M.:
Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1972. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 39). Zugl.: Bochum, Univ., Diss.

[Mai1] Maidl, B.; Diecken, U. van:
Rückprallreduzierung beim Spritzbeton: Möglichkeiten aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht
In: Beton 40 (1990) 6, S. 241–245

[Mai2] Maidl, B.; Berger, T.:
Empfehlungen für den Spritzbetoneinsatz im Tunnelbau
In: Bauingenieur 70 (1995) 1, S. 11–19

[Mai3] Maidl, B.; Tallarek, F.; Rohrbeck, M.:
Prüfverfahren zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Spritzbeton
In: Bauingenieur 71 (1996) 11, S. 497–503

[Man1] Manns, W.:
Gemeinsame Anwendung von Silicastaub und Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff: Eine technologische Betrachtung
In: Beton 47 (1997) 12, S. 716–720

[Man2] Manns, W.; Neubert, B.:
Spritzbeton mit Erstarrungsbeschleuniger: Mechanisch-technologische Eigenschaften
In: Beton 43 (1993) 1, S. 20–25

[Man3] Manns, W.; Laskowski, C.:
Eisen(II)sulfat als Zusatz zur Chromatreduzierung: Lösung des Chrom(VI)-Problems möglich
In: Beton 49 (1999) 2, S. 78–85

[Man4] Manns, W.:
Elastizitätsmodul von Zementstein und Beton
In: Beton 20 (1970) 9, S. 401–405; 10, S. 455–460

[Man5] Manns, W.; Neubert, B.; Zimbelmann, R.:
Spritzbeton im Test: Festigkeitsentwicklung und Verformungsverhalten
In: Beton 37 (1987) 8, S. 317–319

[Mce1] Mcedlov-Petrosjan, O. P.; Babuskin, V. I.; Matwejew, G. M.:
Thermodynamik der Silikate. – 2. Aufl. – Berlin: VEB Verl. f. Bauwesen, 1966, S.251 ff.

[Meh1] Mehta, P. K.:
Mechanism of sulfate attack on portland cement and concrete
In: Cement and Concrete Research 13 (1983) 3, S. 401–406

[Meh2] Mehta, P. K.; Wang, S.:
Expansion of ettringite by water absorption
In: Cement and Concrete Research 12 (1982) 1, S. 121–122

[Men1] Meng, B.; Wiens, U.:
Einfluß von Puzzolanen als Betonzusatzstoff auf die Alkalität der Porenlösung
In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Berichtsband zum vierten internationalen Kolloquium; Band 3 (Esslingen, 17.–19. 12. 1996) / Wittmann, F. H. (Hrsg.). – Freiburg: Adificatio Verl., 1996, S. 1655–1669

[Mes1] *Innovatives Bauen: 5.1 Textilbewehrter Beton – Material und Produkte; Techtextil Symposium Block 5: April 13, 1999, morning (Techtextil Symposium Frankfurt/M., 13.–15. 4. 1999)* / Messe Frankfurt (Hrsg.). – Frankfurt/M.: Messe Frankfurt, 1999

[Mes2] *Innovatives Bauen: 5.2 Textilbewehrter Beton – Anwendungen; Techtextil Symposium Block 5: April 13, 1999, afternoon (Techtextil Symposium Frankfurt/M., 13.–15. 4. 1999)* / Messe Frankfurt (Hrsg.). – Frankfurt/M.: Messe Frankfurt, 1999

[Mey1] Meyer, A.:
Faserbeton
In: Zement-Taschenbuch 1979/80 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). – 47. Ausg. – Wiesbaden: Bauverl., 1979. – ISBN 3-7625-0903-4, S. 453–477

[Mey2] Meyer, A.:
Über den Einfluß des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton
In: Betonstein-Zeitung 29 (1963) 8, S. 391–394

[Mey3] Meyer-Ottens, C.:
Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen. – Berlin: Ernst u. Sohn, 1975. – ISBN 3-433-00699-7

[Mor1] Mori, H.; Minegishi, K.:
Effect of the temperature on the early hydration of the system $3CaO \cdot Al_2O_3$-$CaSO_4 \cdot 2H_2O$-$Ca(OH)_2$-H_2O
In: Proceedings of the fifth international symposium on the chemistry of cement: part II Hydration of cements (Tokyo 1968) / Cement Association of Japan (Hrsg.). – Tokyo: Cement Association of Japan, 1969, S. 349–371

[Mor2] Morgan, R. G.:
Concrete construction underwater
In: World Construction (1975) 11, S. 62–67

[Mös1] Möser, B.:
Hydratation des Portlandzementes
In: Anorganische Bindemittel: Zement, Kalk, Spezielle Bindemittel / Stark, J.; Wicht, B.(Hrsg.). – Weimar: Bauhaus-Univ. Weimar, Fak. Bauingenieurwesen, 1998. – (Bauhaus-Universität Weimar: Schriften 109). – ISBN 3-86068-093-5, S. 173–249

[Mül1] Müller-Pfeiffer, M.; Ellerbrock, H.-G.:
Mahlverfahren und Leistungsfähigkeit von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen: Vortrag / Technisch-wissenschaftliche Tagung des Vereins Deutscher Zementwerke (Ulm 15. 9. 1998)

[Näg1] Naegele, E.; Hillemeier, B.; Hilsdorf, H. K.:
Der Angriff von Ammoniumsalzlösungen auf Beton: Attack of Ammonium Salt Solutions of Concrete
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 50 (1984) 11, S. 742–751

[Nau1] Nause, P.; Hosser, D.:
Brandverhalten von Druckgliedern aus hochfestem Beton
In: Kurzreferate / Braunschweiger Brandschutz-Tage 1995, 6. Fachseminar Brandschutz – Froschung und Praxis (Braunschweig 4.–5. 10. 1995) / Institut f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, IBMB (Hrsg.). – Braunschweig: IBMB, 1995. – ISBN 3-89288-093-X

[Nec1] Neck, U.:
Leistungfähigkeit von Beton in Bauwerken zur Abwasserentsorgung
In: Beton 47 (1997) 7, S. 400–405

[Nec2] Neck, U.:
Baulicher Brandschutz mit Beton. – 3. überarb. u. erw. Aufl. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1994

[Nec3] Neck, U.:
Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton
In: Beton 38 (1988) 12, S. 488–493

[Nei1] Neisecke, J.:
Karbonatisierung von Stahlbeton – wirklich ein Problem?
In: Beton-Informationen 31 (1991) 3/4, S. 27–31

[Neu1] Neumann, R.:
Geologie für Bauingenieure. – Berlin: Ernst, 1964

[Nev1] Neville, A. M.; Dilger, W. H.; Brooks, J. J.:
Creep of plain and structural concrete. – London: Construction Press, 1983

[Nis1] Nischer, P.:
Einführung von künstlichen Luftporen in Fließbeton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 43 (1977) 6, 285–288

[Nis2] Nissing, W.; Klein, N.:
pH-Wert-Erhöhung bei der Inbetriebnahme von Guß- und Stahlrohrleitungen mit Zementmörtel-Auskleidungen: Technische Mitteilung 2/96
In: Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, Rohrleitungsbau 47 (1996) 2, 6 S.

[Odl1] Odler, I.:
Hydration, setting and hardening of portland cement
In: Lea's chemistry of Cement and Concrete / Hewlett, P. C. (Hrsg.). – 4. Aufl. – London (u. a.): Arnold, 1998. – ISBN 0-340-56589-6, S. 241–297

[Odl2] Odler, I.:
Interaction between gypsum and the C-S-H phase formed in C_3S hydration
In: Seventh international congress on the chemistry of cement: Volume IV (Paris 1980). – Paris: Ed. Septima, 1981, S. 493–495

[Odl3] Odler, I.:
Über die Rißbildung bei der Warmbehandlung des Betons
In: Beton 35 (1985) 6, S. 235–237

[Oht1] Ohta, A.; Sugiyama, T.; Tanaka, Y.:
Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers
In: Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete: Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference Rome, Italy, 1997 (CANMET/ACI Internat. Symposium: 5; Superplasticizers and other chemical admistures in concrete, Rome, 7.–10. 10. 1997) / Malhotra, V.M. (Hrsg.). – Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1997. – (ACI Publication SP 173), S. 359–378

[Oka1] Okamura, H.; Ozawa, K.:
Mix design for self-compacting concrete: Translation from Proc. of JSCE, No. 496/V-24, 1994.8
In: Concrete Library of JSCE (1995) 25, S. 107–120

[Pas1] Paschmann, H.; Kuhlmann, K.:
Ökologische Überlegungen zur Werkstoffauswahl bei Abwasserrohren: Betrachtung der Herstellungsweise
In: Abwassertechnik 47 (1996) 6, S. 17–22

[Pis1] Pisters, H.:
Chrom im Zement und Chromatekzem
In: Zement-Kalk-Gips 19 (1966) 10, S. 467–472

[Pow1] Powers, T. C.; Brownyard, T. L.:
Studies of the physical properties of hardened portland cement paste: Part 2: Studies of water fixation
In: American Concrete Institute: Journal 18 (1946) 3, S. 249–336

[Püh1] Pühringer, J.:
Ein Modell zur Beschreibung der Mineralzerstörung durch Frost-Tauwechsel: Eine Literaturstudie
In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3 (Werkstoffwissenschaften und Bausanierung: 3, Esslingen) / Wittmann, F. H. (Hrsg.). – Ehningen: Expert Verl., 1993. – (Kontakt u. Studium 420). – ISBN 3-8169-0953-1, S. 1532–1551

[Pun1] Punzet, M.; Ludwig, U.:
Über die chemische Stabilität des Ettringit
In: Tonindustrie-Zeitung 98 (1974) 8, S. 181–187

[Ram1] Ramey, G. E.; Pittman, D. W.; Webster, G. K.:
Shrinkage compensating concrete for bridge decks: Guidelines for Type K cement; moist curing conditions are a must when using shrinkage compensating concrete
In: Concrete International 21 (1999) 4, S. 29–34

[Rea1] *Betonbau im Wandel der Zeit: Beitr., Beisp., Zitate zur Entwicklung d. Betonarchitektur in Deutschland* / Readymix Transportbeton GmbH (Hrsg.). – Ratingen: Readymix Transportbeton GmbH, 1986. – ISBN 3-7640-0220-4

[Rec1] Rechenberg, W.; Sylla, H.-M.:
Die Wirkung von Ammonium auf Beton
In: Beton 43 (1993) 1, S. 26–31

[Rec2] Rechenberg, W.; Sylla, H.-M.:
Die Wirkung von Magnesium auf Beton
In: Zement-Kalk-Gips 49 (1996) 1, S. 44–56

[Rec3] Rechenberg, W.:
Über das Verhalten von Mahlhilfen beim Mahlen von Zement
In: Zement-Kalk-Gips 39 (1986) 10, S. 577–580

[Reh1] Rehm, G.; Diem, P.; Zimbelmann, R.:
Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton. – Berlin: Beuth, 1977. – (DAfStb: Schriftenreihe 283). – ISBN 3-433-00803-5

[Rei1] Reinsdorf, S.:
Quellzemente: Herstellung, Eigenschaften und Verwendung. – Berlin: Bauinformation, 1986. – (Bauforschung – Baupraxis 180)

[Ren1] Rendchen, K.:
Einfluß der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1985. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 45). – ISBN 3-7640-0178-X. Zugl.: Aachen, RWTH, Diss.

[Rep1] *The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction; Report of the Thaumasite Expert Group* / Department of the Environment,Transport and the Regions, DETR (Hrsg.). – London: DETR, 1999

[Res1] Reschke, T.:
Der Einfluß der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. – Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, i. Vorber. – (Schriftenreihe der Zementindustrie)

[Res2] Reschke, T.; Siebel, E.; Thielen, G.:
Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton
In: beton 49 (1999) 12, S. 719–724; 50 (2000) 1, S. 47–50

[Reu1] Reusser, L.:
Ökobilanz von Rohrleitungssystemen: Eine Fallstudie am Beispiel der Erstellung der Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserentsorgung für eine Einfamilienhaussiedlung; Kurzfassung. – St. Gallen: Eidgen. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, 1998

[Ric1] Richartz, W.:
Zusammensetzung und Eigenschaften von Flugaschen
In: Zement-Kalk-Gips 37 (1984) 2, S. 62–71

[Ric2] Richartz, W.:
Einfluß des K_2O-Gehalts und des Sulfatisierungsgrads auf Erstarren und Erhärten des Zements
In: Zement-Kalk-Gips 39 (1986) 12, S. 678–687

[Ric3] Rickert, J.; Grube, H.:
Analyse von Restwasserinhaltsstoffen
In: Beton 49 (1999) 7/8, S. 461–468

[Roh1] Rohmann, U.:
Grundlagen des „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts"
In: Wasserchemie für Ingenieure / Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches. DVGW (Hrsg.). – München (u. a.): Oldenbourg, 1993. – (Lehr- und Handbuch Wasserversorgung Bd.5). –
ISBN 3-486-26307-2, S. 189–214

[Ros1] Ellerbrock, H.-G.; Rosemann, H.:
Mahltechnik für die Zementherstellung – Entwicklung, Stand und Ausblick
In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998) 2, S. 51–62

[Ros2] Rostasy, F. S.:
Baustoffe. – Stuttgart (u. a.): Kohlhammer, 1983. – (Lehrbuchreihe Architektur). – ISBN 3-17-007928-X

[Ros3] Rostasy, F. S.; Henning, W.:
Zwang und Rißbildung in Wänden auf Fundamenten. – Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DafStb, 1990. – (DAfStb: Schriftenreihe 407). – ISBN 3-410-65607-3

[Rud1] Rudersdorf, F. A.:
Schleuderbeton-Rundstützen: Gestaltungselement für die Architektur als vorgefertigtes Bauteil höchster Qualität
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 55 (1989) 12, S. 38–43

[Rüh1] Rühl, R.:
Prävention durch die Wahl schadstoffarmer Baustoffe
In: Staub – Reinhaltung der Luft 52 (1992) 12, S. 449–453

[Ruf1] Ruffert, G.:
Spritzbeton heute
In: Betonbau in Forschung und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von György Iványi . – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1999. – ISBN 3-7640-0384-7, S. 51–57

[Ruf2] Ruffert, G.:
Einsatz von Spritzbeton im Tunnelbau
In: Straßen- und Tiefbau 49 (1995) 6, S. 10–14

[Ruf3] Ruffert, G.:
Brandschäden an Betonbauten: Feststellung, Beurteilung, Sanierung
In: Beton 26 (1976) 7, S. 239–243

[Sad1] Sadowsky, U.; Kuhlmann, K.; Schneider, M.:
Entstehung von Kohlenmonoxid aus den organischen Bestandteilen des Rohmaterials bei der Zementherstellung
In: Zement-Kalk-Gips 50 (1997) 5, S. 272–280

[Saw1] Sawyer, J. L.:
Wear Tests on concrete using the German Standard Methode of Test and Machine
In: ASTM Proceedings 57 (1957) S. 1143–1153

[Sch1] Scheibe, W.:
100 Jahre Rohrkugelmühle – ein historischer Rückblick
In: Zement-Kalk-Gips 46 (1993) 3, S. 123–128

[Sch2] Scheuer, A.; Ellerbrock, H.-G.:
Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Zementherstellung
In: Zement-Kalk-Gips 45 (1992) 5, S. 222–230

[Sch3] Kuhlmann, K.; Schneider, M.:
Der Einfluß von Staubemissionen bei der Zementherstellung auf die Immissionssituation in der Werksumgebung
In: Zement-Kalk-Gips 49 (1996) 8, S. 413–423

[Sch4] Schneider, M.; Hoenig, V.:
Anwendung der „Best Available Techniques" (BAT) in der deutschen Zementindustrie
In: Zement-Kalk-Gips 53 (2000) 1, S. 1–11

[Sch5] Schnatz, R.:
Verarbeitungseigenschaften von Zement bei der Fertigmahlung in Mahlanlagen mit Gutbett-Walzenmühle. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1998. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 58). – ISBN 3-7640-0367-7. Zugl.: Clausthal, TU, Diss.

[Sch6] Schießl, P.:
Wirkung von Steinkohlenflugaschen in Beton
In: Beton 40 (1990) 12, S. 519–523

[Sch7] Schießl, P.; Alfes, C.; Sybertz, F.; Vannahme, S.:
Verwendung von Kunststoffdipersionen als Zusatzstoff für Beton nach DIN 1045 bei Einwirkung umweltgefährdender Flüssigkeiten
In: Bauingenieur 68 (1993) 1, S. 19–26

[Sch8] Schießl, P.; Rößler, G.:
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung einer Styrol-Acrylat-Dispersion als Betonzusatzstoff
In: Bauingenieur 71 (1996) 11, S. 489–495

[Sch9] Scholz, U.; Nechvatal, D.; Aschl, H.; Linse, D.; Stöckl, S.; Grasser, E.; Kupfer, H.:
Versuche zum Verhalten von Beton unter dreiachsiger Kurzzeitbeanspruchung
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 447, 1995, S. 7–63

[Sch10] *Corrosion of Steel in Concrete: Report of the technical committee 60-CSC RILEM (the international union of testing and research laboratories for materials and structures)* / Schiessl, P. (Hrsg.). – London: Chapman and Hall, 1988. – ISBN 0-412-32100-9

[Sch11] Schießl, P.:
New approaches to monitoring and repair of concrete structures
In: Extending the lifespan of structures: IABSE Symposium San Francisco, 1995; report / International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE (Hrsg.). – Zürich: ETH Hönggerberg, 1995. – (Iabse Report: 73). – ISBN: 3-85748-087-4, S. 25–52

[Sch12] Schießl, P.; Härdtl, R.; Meng, B.:
Sulfatwiderstand von Beton mit Steinkohlenflugasche
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 62 (1996) 12, S. 97–105

[Sch13] Schneider, U.:
Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. – Braunschweig: Inst. f. Baustoffe, Massivbau u. Brandschutz, IBMB, 1979

[Sch14] Schoewert, L. C.; Hillen, H. F.:
Underwater transporting of concrete with the hydro-valve
In: American Concrete Institute: Proceedings 69 (1972) 9, S. 584–588

[Sch15] Schmidt-Morsbach, J.:
Sichtbeton: Taschenbuch für Planung und Ausführung glatter Betonflächen. – Wiesbaden: Bauverl., 1964

[Sch16] Schmidt, M.; Spanka, G.:
Verwertung von teerhaltigem Ausbauasphalt in hydraulisch gebundenen Tragschichten: Verminderung des Schadstoffaustrages
In: Straße und Autobahn 41 (1990) 3, S. 118–122

[Sch17] *Fortschritte beim Transportbeton: für Hersteller von Transportbeton und Werk-Frischmörtel, Lieferanten der Ausgangsstoffe, Mitarbeiter von Bauunternehmen, Planer von Hoch- und Tiefbauten, Architekten und Beratende Ingenieure, Bauherren, Bauträger und Baubehörden, Materialprüfanstalten, Forschungsinstitute und Sachverständige* / <Leitung:> Schuhmacher, W. – Ostfildern: Techn. Akademie Esslingen, 1993

[Set1] Setzer, M. J.:
Basis of testing the freeze-thaw resistance: Surface and internal deterioration
In: Frost resistance of concrete: Proceedings of the international RILEM workshop on resistance of concrete to freezing and thawing with or without de-icing chemicals / Setzer, M.J.; Auberg, R. (Hrsg.). – London (u. a.): E. & F.N. Spon, 1997. – (RILEM Proceedings 34). – ISBN 0-419-22900-0, S. 157–173

[Set2] Setzer, M. J.:
Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons
In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 280. 1977, S. 43–117

[Set3] Setzer, M. J.:
Grundlagen zu Frost-Tau-Prüfverfahren – Oberflächenabwitterung und innere Schädigung
In: Betonbau in Forschung und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von György Iványi. – Düsseldorf: Verl. Bau + Technik, 1999. – ISBN 3-7640-0384-7, S. 93–98

[She1] Shen, J.-H.:
Lineare und nichtlineare Theorie des Kriechens und der Relaxation von Beton unter Druckbeanspruchung. – Berlin: Beuth, 1992. – (DAfStb: Schriftenreihe 432). – ISBN 3-410-65632-4

[SIA1] *Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten* / Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA (Hrsg.). – Zürich: SIA, 1995. – (SIA Dokumentation D 0123)

[Sie1] Siebel, E.:
Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1989. – (Schriftenreihe der Zementindustrie 50). – ISBN 3-7640-0252-2. Zugl.: Darmstadt, TH, Diss.

[Sie2] Siebel, E.:
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton: Beurteilung mittels Würfelverfahren
In: Beton 42 (1992) 9, S. 496–501

[Sie3] Siebel, E.; Eickschen, E.:
Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton. – Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1993. – (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 640)

[Sie4] Siebel, E.; Breit, W.:
Standard Methods for Testing the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing: European Research Project No. 3085; Technischer Bericht – Final Report Be-TB-1489-4/1998 vom 27. 10. 1998; MAT1-CT94-0055. – Düsseldorf: Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ, 1998

[Sie5] Siebel, E.; Reschke, T.:
Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer: Untersuchungen an Laborbetonen
In: Beton 46 (1996) 12, S.740-744; 47 (1997) 1, S. 26–32

[Sie6] Siebel, E.; Dahms, J.:
Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion
In: Beton 47 (1997) 9, S. 533–537

[Sie7] Siebel, E.:
Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton
In: Beton 45 (1995) 10, S. 724–730

[Sie8] Siebel, E.; Eickschen, E.:
Lärmarme Betonfahrbahndecken – ein europäisches Forschungsprojekt
In: Straße und Autobahn 46 (1995) 11, S. 658–662

[Sil1] Sillem, H.; Ellerbrock, H.-G.; Funke, G.:
Die Entwicklung der Verfahrenstechnik im Spiegel der Tagungsberichte der deutschen Zementindustrie
In: Verfahrenstechnik der Zementherstellung: VDZ-Kongreß '77 (Düsseldorf 1977) / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). – Wiesbaden: Bauverl., 1979, S. 19–34

[Smo1] Smolczyk, H.-G.:
Stand der Kenntnis über Chloriddiffusion im Beton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 50 (1984) 12, S. 837–843

[Son1] Sonnenberg, R.:
Betonmischer und Mischsysteme
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 64 (1998) 7, S. 88–98

[Son2] Sonnenberg, R.:
Betonpumpen und Verteilermasten: Einsatzmöglichkeiten und Weiterentwicklungen
In: Beton 48 (1998) 8, S. 476–485

[Sor1] Soretz, S.:
Korrosion von Betonbauten – ein neues Schlagwort?
In: Zement und Beton 24 (1979) 1, S. 21–29

[Spa1] Spanka, G.; Thielen, G.:
Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten
In: Beton 45 (1995) 5, S. 320–327

[Spa2] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.:
Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel
In: Beton 45 (1995) 11, S. 802–808

[Spa3] Spanka, G.; Thielen, G.:
Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Zusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten.
In: Beton 45 (1995) 5, S. 320–327

[Spa4] Spanka, G.; Thielen, G.:
Freisetzung flüchtiger Substanzen aus zementgebundenen Bauprodukten
In: Beton 49 (1999) 2, S. 111–114; 3, S. 173–177

[Spr1] Sprung, S.; Sybertz, F.; Thielen, G.:
Die neue deutsche Zementnorm DIN 1164-1
In: Beton 45 (1995) 7, S. 490–497

[Spr2] Sprung, S.:
Umweltentlastung durch Verwertung von Sekundärrohstoffen
In: Zement-Kalk-Gips 45 (1992) 5, S. 213–221

[Spr3] Sprung, S.; Kuhlmann, K.; Ellerbrock, H.-G.:
Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement: Teil 2: Wasseranspruch von Portlandzement
In: Zement-Kalk-Gips 38 (1985) 9, S. 528–534

[Spr4] Sprung, S.; Rechenberg, W.:
Einbindung von Schwermetallen in Sekundärstoffen durch Verfestigen mit Zement
In: Beton 38 (1988) 5, S. 193–198

[Spr5] Sprung, S.; Rechenberg, W.:
Bindung umweltrelevanter Sekundärstoffe durch Verfestigen mit Zement
In: Zement und Beton 34 (1989) 2, S. 54–61

[Spr6] Springenschmid, R.; Nischer, P.:
Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton
In: Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) 9, S. 221–226

[Spr7] Sprung, S.:
Beton für Meerwasserentsalzungsanlagen
In: Beton 28 (1978) 7, S. 241–245

[Spr8] Sprung, S.; Sylla, H.-M.:
Ablauf der Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen
In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998) 6, S. 334–345

[Sta1] Stark, J.; Wicht, B.:
Geschichte der Baustoffe. – Weimar: Hochschule f. Architektur u. Bauwesen Weimar, 1995. – (Hochschule f. Architektur u. Bauwesen Weimar, Schriften 99). – ISBN 3-86068-037-4

[Sta2] Stark, J.; Wicht, B.:
Dauerhaftigkeit von Beton. – Weimar: Hochschule f. Architektur u. Bauwesen Weimar, 1995. – (Hochschule f. Architektur u. Bauwesen Weimar, Schriften 100). – ISBN 3-86068-041-2

[Ste1] Steinle, A.; Hahn, V.:
Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. – Berlin: Verl. für Architektur u. Technische Wissenschaften, 1999

[Ste2] Steven, H.:
Geräuschemissionen auf Betonsteinpflaster. – Herzogenrath: Forschungsinstitut Geräusche u. Erschütterungen, FIGE, 1992

[Syb1] Sybertz, F.:
Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff. – Berlin: Beuth, 1993. – (DAfStb: Schriftenreihe 434). – ISBN 3-410-65634-0

[Syl1] Sylla, H.-M.:
Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung
In: Beton 38 (1988) 11, S. 449–454

[Tay1] Taylor, H. F.:
Cement Chemistry. – London (u. a.): Academic Press, 1990. – ISBN 0-12-683900-X

[Teb1] Tebbe, R.:
Anorganische Pigmente, grundsätzliche Eigenschaften und Herstellung
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 58 (1992) 3, S. 130–139

[Teg1] Tegelaar, R.A.; Böhling; Giesbrecht, P.:
Unterwasserbeton Bohrpfahlbeton. – Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 1998. – (Schriftenreihe Spezialbetone 1). – ISBN 3-7640-0365-0

[Thi1] Thielen, G.; Spanka, G.; Rechenberg, W.:
Leaching characteristics of cement bound materials containing organic substances and inorganic trace elements
In: Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete in the Global Environment (Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete in the Global Environment Chicago 10. – 11. 3. 1993) / Portland Cement Association, PCA (Hrsg.). – Skokie, Ill.: PCA, 1993, 17 S.

[Thi2] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.:
Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel
In: Beton 47 (1997) 8, S. 470–475

[Thi3] Thielen, G.; Hintzen, W.:
Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton
In: Beton 44 (1994) 9, S. 522–526; 10, S. 600–607

[Thi4] Thielen, G.; Grube, H.:
Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen im Beton
In: Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990) 6, S. 161–167

[Thi5] Thielen, G.; Sybertz, F.:
Übereinstimmungsnachweis (Güteüberwachung) für Zement: Erläuterungen zum Entwurf von DIN 1164-2
In: Beton 45 (1995) 8, S. 562–568

[Tod1] Tode, E.:
Unterwasserbeton mit ortsfesten Trichtern. – 2. Aufl. – Berlin: Ernst, 1947

[TRG1] *TRGS 613 – Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkungen für chromathaltige Zemente und chromathaltige zementhaltige Zubereitungen*
In: Bundesarbeitsblatt (1999) 7/8, S. 45–47

[Tro1] Trost, H.:
Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech- und Relaxationsprobleme bei Beton und Spannbeton
In: Beton- und Stahlbetonbau 62 (1967) 10, S. 230–238; 11, S. 261–269

[Trü1] Trüb, U.:
Die Betonoberfläche. – Wiesbaden: Bauverl., 1973

[Utz1] Utz, M.:
Kühlen von Frischbeton mit Flüssig-Stickstoff
In: Beton 37 (1987) 2, S. 51–52

[VDE1] *Jahrbuch Stahl 1999* / Verein Deutscher Eisenhüttenleute, VDEh (Hrsg.). – Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1998. – ISBN 3-514-00629-6

[VDZ1] *Verminderung der CO2-Emissionen: Monitoring-Bericht 1998; Beitrag der deutschen Zementindustrie; Fünfte aktualisierte Erklärung zur Klimavorsorge* / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ; Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – 5. Aufl. – Düsseldorf: VDZ, 1999

[VDZ2] *Beton – Hart im Nehmen, stark in der Leistung, fair zur Umwelt: Umweltverträglichkeit von Zement und Beton. Herstellung, Anwendung und Sekundärstoffeinsatz. Die deutsche Zementindustrie informiert* / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ; Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – Düsseldorf: VDZ, 1997

[VDZ3] *Die Bedeutung des Chromates in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen: Sachstandsbericht* / Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – Düsseldorf: FIZ, 1999

[VDZ4] *Branchenregelung „Chromatarme Zemente und Produkte"* / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (u. a.) (Hrsg.). – Düsseldorf: VDZ, 1999

[VDZ5] *Tätigkeitsbericht 1996–1999* / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ; Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – Düsseldorf: VDZ, 1999

[Ver1] *Deutsche Portland-Cement- und Beton-Industrie auf der Düsseldorfer Ausstellung 1902* / Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten, PDCF; Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Düsseldorf: Beton-Verl., 1982. – ISBN 3-7640-0175-5

[Vin1] Vinkeloe, R.; Weber, R.:
Ermittlung der Temperatur des frischen und des erhärtenden Betons
In: Beton-Informationen 26 (1986) 5, S. 47–52

[Vog1] Vogel, P.; Schmidt, M.:
Umweltsichere Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch mit hydraulischen Spezialbindemitteln
In: Straße und Autobahn 45 (1994) 2, S. 82–90

[Vol1] Volkwein, A.:
Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton
In: Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993) 8, S. 223–226

[Vre1] De Vree, R. T.; Tegelaar, R. A.:
Gewichtete Reife des Betons: Kontinuierliche, zerstörungsfreie Ermittlung der Betondruckfestigkeit
In: beton 48 (1998) 11, S. 674–678

[Wal1] Walz, K.:
Carbonatisierung des Betons: Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung
In: Beton 22 (1972) 7, S. 296–299

[Wal2] Walz, K.:
Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit
In: Beton 20 (1970) 11, S. 499–503

[Wal3] Walz, K.:
Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren
In: Beton 26 (1976) 3, S. 95–98; 4, S. 135–138

[Wal4] Walz, K.:
Witterungsbeständigkeit von Beton: Verhalten von Betonplatten während 12-jähriger Lagerung im Freien und bei Frost-Tauwechseln im Laboratorium. – Berlin: Ernst u. Sohn, 1957. – (DAfStb: Schriftenreihe 127)

[Wal5] Walz, K.:
Eigenschaften und Verhalten von Beton nach 29jähriger Lagerung im Freien
In: Beton 22 (1972) 2, S. 63–69

[Wal6] Walz, K.; Wischers, G.:
Über den Widerstand von Beton gegen die mechanische Einwirkung von Wasser hoher Geschwindigkeit
In: Beton 19 (1969) 9, S. 403–406; 10, S. 457–460

[Wal7] Walz, K.:
Anleitung für beständigen Beton: Bearbeitung eines Berichts des ACI Committee 201 „Guide to durable concrete"
In: Beton 29 (1979) 7, S. 254–257; 8, S. 285–289; 9, S. 323–327; 10, S. 360–366

[Wal8] Walz, K.:
Rüttelbeton. – 3. Aufl. – Berlin: Ernst, 1960

[Web1] Weber, R.; Tegelaar, R.:
Guter Beton: Ratschläge für die richtige Betonherstellung. – 19. Aufl. – Düsseldorf: Beton-Verl., 1995. – ISBN 3-7640-0313-8

[Web2] Weber, H.; Hullmann, H.:
Porenbeton-Handbuch: Planen und Bauen mit System. – 4. durchges. Aufl. – Wiesbaden: Bundesverband Porenbeton, 1999. – ISBN 3-7625-3520-5

[Wei1] Weigler, H.; Karl, S.:
Beton: Arten, Herstellung, Eigenschaften. – Berlin: Ernst, 1989. – (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau). – ISBN 3-433-01332-2

[Wei2] Weigler, H.; Karl, S.:
Junger Beton: Beanspruchung, Festigkeit, Verformung. – Darmstadt: Institut für Massivbau, 1974. – (Forschungsberichte a. d. Inst. f. Massivbau d. TH Darmstadt 20)

[Wes1] Wesche, K.:
Baustoffe für tragende Bauteile: Band 2: Beton, Mauerwerke (nichtmetallisch-anorganische Stoffe; Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit). – 3. völlig neubearb. u. erw. Aufl. – Wiesbaden (u. a.): Bauverl., 1993. – ISBN 3-7625-2681-8

[Wes2] Wesche, K.:
Die Bedeutung der Zementleimvormischung für die Praxis der Betonherstellung
In: Beton- und Stahlbetonbau 55 (1960) 11, S. 252–257

[Wie1] Wierig, H.-J.:
Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von „grünen" und „jungen" Betonen und denen des Festbetons
In: Beton 21 (1971) 11, S. 445–448

[Wie2] Wierig, H.-J.:
Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure
In: Proceedings of the Rilem Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure: Regulations, test methods, assessment criteria, research results (RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor

Exposure Hannover 26.–29. 3. 1984) / <Organized for>: RILEM Concrete Permanent Committee CPC 14. – Hannover: Univ. Hannover, Inst. f. Baustoffkunde u. Materialprüfung, 1985, S. 239–249

[Wie3] Wierig, H.-J.:
Eigenschaften von „grünem, jungem" Beton: Druckfestigkeit, Verformungsverhalten, Wasserverdunstung
In: Beton 18 (1968) 3, S. 94–101

[Wis1] Wischers, G.; Sprung, S.:
Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche – Sachstandsbericht Mai 1989
In: Beton 40 (1990) 1, S. 17–21

[Wis2] Wischers, G.:
Leistungsfähigkeit als Kriterium für die Normung von Zement und Beton
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 56 (1990) 3, S. 51–60

[Wis3] Wischers, G.; Krumm, E.:
Zur Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln
In: Beton 25 (1975) 8, S. 279–282; 9, S. 314–318; 10, S. 351–355

[Wis4] Wischers, G.:
Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton
In: Beton 31 (1981) 9, S. 337–340; 10, S. 385–389

[Wis5] Wischers, G.; Manns, W.:
Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton
In: Beton 23 (1973) 4, S. 167–171

[Wis6] Wischers, G.:
Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf seine Frühfestigkeit
In: Beton 13 (1963) 9, S. 427–432

[Wis7] Wischers, G.; Neck, U.; Sylla, H.-M.:
Dauerhaftigkeit von wärmebehandelten Betonen hoher Festigkeit
In: Technologie und Anwendung der Baustoffe: Zum 60. Geburtstag von Ferdinand S. Rostasy / Budelmann, Harald (Hrsg.). – Berlin: Ernst, 1992. – ISBN 3-433-01242-3, S.143-152

[Wit1] Wittekindt, W.:
Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung
In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960) 12, S. 565–572

[Wör1] Wörner, R.:
Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton. – Karlsruhe: Univ. Karlsruhe, Inst. f. Massivbau- und Baustofftechnologie, 1994. – (Inst. f. Massivbau u. Baustofftechnologie: Schriftenreihe 23). – ISSN 0933-0461

[Wol1] Wolter, A.:
Development of the short rotary kiln and the use of low grade coal in cement plants
In: TIZ-Fachberichte 111 (1987) 12, S. 905–909

[Xel1] Xeller, H.:
Neue Entwicklungen bei der NOx-Minderung in der Zementindustrie
In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998) 3, S. 144–150; 4, S. 208–218

[Yan1] Yang, R.; Lawrence, C. D.; Sharp, J. H.:
Delayed Ettringite Formation in 4-year old cement pastes
In: Cement and Concrete Research 26 (1996) 11, S. 1649–1659

[Zan1] Zantz, E.:
Die Vakuumbehandlung von Beton
In: Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau 18 (1976) 10, S. 684–694

[Zan2] Zantz, E.:
Das Vakuum-Beton-Verfahren: Eine Technologie zur wirksamen Vermeidung von Rissen in jungem Beton
In: Spannbetonbau in der Bundesrepublik Deutschland 1978-1982 / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Wiesbaden: DBV, 1982, S. 149–151

2 Wichtige Baunormen, Richtlinien, Merkblätter, Gesetze und Verordnungen, Ausländische Normen und Richtlinien

2.1 Baunormen

Zement

DIN 1164 **Zement**

Teil 1	Zusammensetzung, Anforderungen; Ausgabe: 1994-10
Teil 1/ A1	Zusammensetzung, Anforderungen; Änderung A1; Ausgabe: 1999-01
Teil 2	Übereinstimmungsnachweis; Ausgabe: 1996-11
Teil 8	Bestimmung der Hydratationswärme mit dem Lösungskalorimeter; Ausgabe: 1978-11
Teil 31	Bestimmung des Hüttensandanteils von Eisenportland- und Hochofenzement und des Traßanteils von Traßzement; Ausgabe: 1990-03

DIN EN 196 **Prüfverfahren für Zement**

Teil 1	Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:1994; Ausgabe: 1995-05
Teil 2	Chemische Analyse von Zement; Deutsche Fassung EN 196-2:1994; Ausgabe: 1995-05
Teil 3	Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:1994; Ausgabe: 1995-05
DIN V ENV 196 Teil 4	Quantitative Bestimmung der Bestandteile; Deutsche Fassung ENV 196-4:1993; Ausgabe: 1993-11
Teil 5	Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanzementen; Deutsche Fassung EN 196-5:1994; Ausgabe: 1995-05

	Teil 6	Bestimmung der Mahlfeinheit; Deutsche Fassung EN 196-6:1989, Ausgabe: 1990-03
	Teil 7	Verfahren für die Probenahme und Probenauswahl von Zement; Deutsche Fassung EN 196-7:1989; Ausgabe: 1990-03
E DIN EN 196	Teil 8	Hydratationswärme; Lösungsverfahren; Deutsche Fassung prEN 196-8:1997; Ausgabe: 1997-05
E DIN EN 196	Teil 9	Hydratationswärme; Teiladiabatisches Verfahren; Deutsche Fassung prEN 196-9:1997; Ausgabe: 1997-05 Prüfverfahren für Zement
	Teil 21	Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement; Deutsche Fassung EN 196-21:1989; Ausgabe: 1990-03

prEN 197 **Normalzement**

Teil 1	Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Ausgabe: 1999-12
Teil 2	Konformitätsbewertung; Ausgabe: 1999-12

Sonstige Bindemittel und Zusatzstoffe

DIN 1060 **Baukalk**

Teil 1	Definitionen, Anforderungen, Überwachung; Ausgabe: 1995-03

DIN 1168 **Baugipse**

Teil 1	Begriff, Sorten und Verwendung; Lieferung und Kennzeichnung; Ausgabe: 1986-01
Teil 2	Anforderungen, Prüfung, Überwachung; Ausgabe: 1975-07

DIN 4208 **Anhydritbinder**

Ausgabe: 1997-04

DIN 4211 **Putz- und Mauerbinder**

Anforderungen, Überwachung; Ausgabe: 1995-03

DIN 18506 **Hydraulische Tragschichtbinder**

Hydraulische Bindemittel für Tragschichten, Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen; Ausgabe: 1991-06

Teil A1 Hydraulische Bindemittel für Tragschichten, Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen; Änderung 1; Ausgabe: 1998-05

DIN 51043 **Traß**

Anforderungen, Prüfung; Ausgabe: 1979-08

DIN EN 413 **Putz- und Mauerbinder**

DIN V ENV 413 Teil 1 Anforderungen; Deutsche Fassung ENV 413-1:1995; Ausgabe: 1995-03

Teil 2 Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 413-2:1994; Ausgabe: 1995-03

DIN EN 450 **Flugasche für Beton**

Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN 450:1994; Ausgabe: 1995-01

DIN EN 451 **Prüfverfahren für Flugasche**

Teil 1 Bestimmung des freien Calciumoxidgehalts; Deutsche Fassung EN 451-1:1994; Ausgabe: 1995-01

Teil 2 Bestimmung der Feinheit durch Naßsiebung; Deutsche Fassung EN 451-2:1994; Ausgabe: 1995-01

DIN EN 459 **Baukalk**

Teil 2 Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 459-2:1994; Ausgabe: 1995-03

E DIN EN 459 Teil 1 Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung prEN 459-1:1998; Ausgabe: 1999-01

E DIN EN 459 Teil 2 Prüfverfahren;
Deutsche Fassung prEN 459-2:1998;
Ausgabe: 1999-01

E DIN EN 459 Teil 3 Konformitätsbewertung;
Deutsche Fassung prEN 459-3:1998;
Ausgabe: 1999-01

DIN EN 12878 **Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen**

Anforderungen und Prüfung;
Deutsche Fassung EN 12878:1999;
Ausgabe: 1999-09

E DIN EN 13263 **Silicastaub für Beton**

Definitionen, Anforderungen und Konformitätslenkung;
Deutsche Fassung prEN 13263:1998;
Ausgabe: 1998-08

E DIN EN 13639 **Bestimmung des Gesamtgehalts an organischem Kohlenstoff in Kalkstein**

Deutsche Fassung prEN 13639:1999;
Ausgabe: 1999-10

Zuschlag / Gesteinskörnungen

DIN 4226 **Zuschlag für Beton**

Teil 1 Zuschlag mit dichtem Gefüge; Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen;
Ausgabe: 1983-04

Teil 2 Zuschlag mit porigem Gefüge (Leichtzuschlag); Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen;
Ausgabe: 1983-04

Teil 3 Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge;
Ausgabe: 1983-04

Teil 4 Überwachung (Güteüberwachung);
Ausgabe: 1983-04

E DIN 4226 **Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel**

Teil 1 Normale und schwere Gesteinskörnungen;
Ausgabe: 1999-12

Teil 2 Leichte Gesteinskörnungen;
Ausgabe: 2000-xx (in Vorbereitung)
Teil 100 Rezyklierte Gesteinskörnungen;
Ausgabe: 2000-xx (in Vorbereitung)

DIN 52100 **Naturstein und Gesteinskörnung**

Teil 2 Gesteinskundliche Untersuchungen;
Allgemeines und Übersicht;
Ausgabe: 1990-11

Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen

DIN 52102 Bestimmung von Dichte, Trockenrohdichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität;
Ausgabe: 1988-08

DIN 52103 Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert;
Ausgabe: 1988-10

DIN 52104 Teil 1 Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Verfahren A bis Q;
Ausgabe: 1982-11

Teil 2 Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Verfahren Z;
Ausgabe: 1982-11

DIN V 52104 Teil 3 Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Prüfung von Gesteinskörnungen mit Taumitteln;
Ausgabe: 1992-09

DIN V 52106 Untersuchungsverfahren zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit;
Ausgabe: 1994-08

DIN 52112 Biegeversuch;
Ausgabe: 1988-08

DIN EN 932 **Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen**

Teil 1 Probenahmeverfahren;
Deutsche Fassung EN 932-1:1996;
Ausgabe: 1996-11

Teil 2 Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben; Deutsche Fassung EN 932-2:1999;
Ausgabe: 1999-03

Teil 3 Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung;
Deutsche Fassung EN 932-3:1996;
Ausgabe: 1996-11

Teil 5 Allgemeine Prüfeinrichtungen und Kalibrierung; Deutsche Fassung EN 932-5:1999; Ausgabe: 2000-01

DIN EN 933 **Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen**

Teil 1 Bestimmung der Korngrößenverteilung; Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:1997; Ausgabe: 1997-10

Teil 2 Bestimmung der Korngrößenverteilung; Analysensiebe, Nennmaße der Sieböffnungen; Deutsche Fassung EN 933-2:1995; Ausgabe: 1996-01

Teil 3 Bestimmung der Kornform, Plattigkeitskennzahl; Deutsche Fassung EN 933-3:1997; Ausgabe: 1997-02

Teil 4 Bestimmung der Kornform; Kornformkennzahl; Deutsche Fassung EN 933-4:1999; Ausgabe: 1999-12

Teil 5 Bestimmung des Anteils von gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen; Deutsche Fassung EN 933-5:1998; Ausgabe: 1998-02

E DIN EN 933 Teil 6 Bestimmung des Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen; Deutsche Fassung prEN 933-6:1999 Ausgabe: 2000-02

Teil 7 Bestimmung des Muschelschalengehaltes; Prozentsatz von Muschelschalen in groben Gesteinskörnungen; Deutsche Fassung EN 933-7:1998; Ausgabe: 1998-05

Teil 8 Beurteilung von Feinanteilen – Sandäquivalent-Verfahren; Deutsche Fassung EN 933-8:1999; Ausgabe: 1999-05

Teil 9 Beurteilung von Feinanteilen; Methylenblau-Verfahren; Deutsche Fassung EN 933-9:1998; Ausgabe: 1998-12

E DIN EN 933 Teil 10 Beurteilung von Feinanteilen; Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung); Deutsche Fassung prEN 933-10:1999; Ausgabe: 1999-04

DIN EN 1097 **Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen**

Teil 1 Bestimmung des Widerstands gegen Verschleiß (Micro-Deval);
Deutsche Fassung EN 1097-1:1996;
Ausgabe: 1996-09

Teil 2 Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung;
Deutsche Fassung EN 1097-2:1998;
Ausgabe: 1998-06

Teil 3 Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt;
Deutsche Fassung EN 1097-3:1998;
Ausgabe: 1998-06

Teil 4 Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller;
Deutsche Fassung EN 1097-4:1999;
Ausgabe: 1999-11

Teil 5 Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung;
Deutsche Fassung EN 1097-5:1999;
Ausgabe: 1999-10

E DIN EN 1097 Teil 6 Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme;
Deutsche Fassung prEN 1097-6:1997;
Ausgabe: 1997-05

Teil 7 Bestimmung der Dichte von Füller; Pyknometer-Verfahren;
Deutsche Fassung EN 1097-7:1999;
Ausgabe: 1999-10

Teil 8 Bestimmung des Polierwertes;
Deutsche Fassung EN 1097-8:1999;
Ausgabe: 2000-01

Teil 9 Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß durch Spikereifen; Nordische Prüfung;
Deutsche Fassung EN 1097-9:1998;
Ausgabe: 1998-06

E DIN EN 1097 Teil 10 Bestimmung der Wassersaughöhe;
Deutsche Fassung prEN 1097-10:1999;
Ausgabe: 1999-11

DIN EN 1367 **Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen**

Teil 1 Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel;
Deutsche Fassung EN 1367-1:1999;
Ausgabe: 2000-01

Teil 2 Magnesiumsulfat-Verfahren;
Deutsche Fassung EN 1367-2:1998;
Ausgabe: 1998-05

E DIN EN 1367 Teil 3 Kochversuch für Sonnenbrand-Basalt und Zerfall von Stahlwerksschlacken;
Deutsche Fassung prEN 1367-3:1998;
Ausgabe: 1999-02

Teil 4 Bestimmung der Trockenschwindung;
Deutsche Fassung EN 1367-4:1998;
Ausgabe: 1998-05

E DIN EN 1367 Teil 5 Bestimmung des Widerstandes gegen Hitzebeanspruchung;
Deutsche Fassung prEN 1367-5:1998;
Ausgabe: 1999-01

DIN EN 1744 **Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen**

Teil 1 Chemische Analyse;
Deutsche Fassung EN 1744-1:1998;
Ausgabe: 1998-05

E DIN EN 12620 **Gesteinskörnungen für Beton einschließlich Beton für Straßen und Deckenschichten**

Deutsche Fassung prEN 12620:1996
Ausgabe: 1997-02DIN

ISO 3310 **Analysensiebe; Anforderungen und Prüfungen**

Teil 1 Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe;
Identisch mit ISO 3310-1:1990;
Ausgabe: 1992-02

Teil 2 Analysensiebe mit Lochblechen;
Identisch mit ISO 3310-2:1990;
Ausgabe: 1992-02

DIN EN 480 **Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel – Prüfverfahren**

Teil 1 Referenzbeton und Referenzmörtel für Prüfungen;
Deutsche Fassung EN 480-1:1997;
Ausgabe: 1998-03

Teil 2 Bestimmung der Erstarrungszeit;
Deutsche Fassung EN 480-2:1996;
Ausgabe: 1997-02

Teil 4 Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten);
Deutsche Fassung EN 480-4:1996;
Ausgabe: 1997-02

Teil 5 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme;
Deutsche Fassung EN 480-5:1996;
Ausgabe: 1997-02

Teil 6 Infrarot-Untersuchung;
Deutsche Fassung EN 480-6:1996;
Ausgabe: 1997-02

Teil 8 Bestimmung des Feststoffgehalts;
Deutsche Fassung EN 480-8:1996,
Ausgabe: 1997-02

Teil 10 Bestimmung des wasserlöslichen Chloridgehaltes;
Deutsche Fassung EN 480-10:1996;
Ausgabe: 1997-02

Teil 11 Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton;
Deutsche Fassung EN 480-11:1998;
Ausgabe: 1999-02

Teil 12 Bestimmung des Alkaligehalts von Zusatzstoffen;
Deutsche Fassung EN 480-12:1997
Ausgabe: 1998-01

E DIN EN 480 Teil 13 Referenz-Baumörtel für die Prüfung von Zusatzmitteln für Mörtel;
Deutsche Fassung prEN 480-13:1998;
Ausgabe: 1998-04

DIN EN 934 **Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel**

Teil 2 Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen;
Deutsche Fassung EN 934-2:1997;
Ausgabe: 1998-03

E DIN EN 934	Teil 2/ A1	Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen; Deutsche Fassung EN 934-2:1997/prA1:1998; Ausgabe: 1999-02
E DIN EN 934	Teil 3	Zusatzmittel für Mauermörtel; Definitionen, Anforderungen und Konformität; Deutsche Fassung prEN 934-3:1998; Ausgabe: 1998-11
E DIN EN 934	Teil 4	Zusatzmittel für Einpreßmörtel, Definitionen, Spezifizierungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung prEN 934-4:1995; Ausgabe: 1996-03
E DIN EN 934	Teil 5	Zusatzmittel für Spritzbeton; Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung prEN 934-5:1998; Ausgabe: 1999-02
E DIN EN 934	Teil 6	Probenahme, Güteüberwachung, Konformitätsbestätigung, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung prEN 934-6:1995; Ausgabe: 1995-11

Zugabewasser

prEN 1008 **Zugabewasser für Beton**

Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich Restwasser aus Wiederaufbereitungsanlagen der Betonherstellung als Zugabewasser für Beton;
Ausgabe: 1997-05

Beton, Stahl- und Spannbeton

DIN 1045 **Beton und Stahlbeton**

Bemessung und Ausführung;
Ausgabe: 1988-07

E DIN 1045 **Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton**

Teil 1	Bemessung und Konstruktion; Ausgabe: 1998-12
Teil 2	Beton – Leistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Übereinstimmung; Ausgabe: 1999-07

Teil 3 Bauausführung;
Ausgabe: 1999-02
Teil 4 Herstellung und Überwachung von Fertigteilen;
Ausgabe: 2000-05

DIN 1048 **Prüfverfahren für Beton**

Teil 1 Frischbeton;
Ausgabe: 1991-06
Teil 2 Festbeton in Bauwerken und Bauteilen;
Ausgabe: 1991-06
Teil 4 Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen; Anwendung von Bezugsgeraden und Auswertung mit besonderen Verfahren;
Ausgabe: 1991-06
Teil 5 Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper;
Ausgabe: 1991-06

DIN 1084 **Überwachung (Güteüberwachung) im Beton- und Stahlbetonbau**

Teil 1 Beton B II auf Baustellen;
Ausgabe: 1978-12
Teil 2 Fertigteile;
Ausgabe: 1978-12
Teil 3 Transportbeton;
Ausgabe: 1978-12

DIN 4030 **Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden, Gase**

Teil 1 Grundlagen und Grenzwerte;
Ausgabe: 1991-06
Teil 2 Entnahme und Analyse von Wasser- und Bodenproben;
Ausgabe: 1991-06

DIN 4219 **Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge**

Teil 1 Anforderungen an den Beton, Herstellung und Überwachung;
Ausgabe: 1979-12
Teil 2 Bemessung und Ausführung;
Ausgabe: 1979-12

DIN 4227 **Spannbeton**

Teil 1 Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung;
Ausgabe: 1988-07

Teil 1/A1 Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung; Änderung A1;
Ausgabe: 1995-12

E DIN 4227 Teil 1/A2 Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung; Änderung A2;
Ausgabe: 1999-11

DIN V 4227 Teil 2 Bauteile mit teilweiser Vorspannung;
Ausgabe: 1984-05

Teil 4 Bauteile aus Spannleichtbeton;
Ausgabe: 1986-02

DIN 4235 **Verdichten von Beton durch Rütteln**

Teil 1 Rüttelgeräte und Rüttelmechanik;
Ausgabe: 1978-12

Teil 2 Verdichten mit Innenrüttlern;
Ausgabe: 1978-12

Teil 3 Verdichten bei der Herstellung von Fertigteilen mit Außenrüttlern;
Ausgabe: 1978-12

Teil 4 Verdichten von Ortbeton mit Schalungsrüttlern;
Ausgabe: 1978-12

Teil 5 Verdichten mit Oberflächenrüttlern;
Ausgabe: 1978-12

DIN 18217 **Betonflächen und Schalungshaut**

Ausgabe: 1981-12

DIN 18218 **Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen**

Ausgabe: 1980-09

DIN 18500 **Betonwerkstein**

Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung;
Ausgabe: 1991-04

DIN 52170 **Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton**

Teil 1 Allgemeines, Begriffe, Probenahme, Trockenrohdichte;
Ausgabe: 1980-02

Teil 2 Salzsäureunlöslicher und kalkstein- und/oder dolomithaltiger Zuschlag. Ausgangsstoffe nicht verfügbar;
Ausgabe: 1980-02

Teil 3 Salzsäureunlöslicher Zuschlag. Ausgangsstoffe nicht verfügbar;
Ausgabe: 1980-02

Teil 4 Salzsäurelöslicher und/oder -unlöslicher Zuschlag. Ausgangsstoffe vollständig oder teilweise verfügbar;
Ausgabe: 1980-02

DIN V ENV 206 **Beton**

Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis;
Ausgabe: 1990-10

E DIN EN 206 **Beton**

Eigenschaften, Herstellung und Konformität;
Deutsche Fassung prEN 206:1997;
Ausgabe: 1997-08

DIN V ENV 1992 **Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken**

Teil 1-1 Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-1:1991;
Ausgabe: 1992-06

Teil 1-2 Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-2:1995;
Ausgabe: 1997-05

Teil 1-3 Allgemeine Regeln; Bauteile und Tragwerke aus Fertigteilen;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-3:1994;
Ausgabe: 1994-12

Teil 1-4 Allgemeine Regeln; Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-4:1994;
Ausgabe: 1994-12

Teil 1-5 Allgemeine Regeln; Tragwerke mit Spanngliedern ohne Verbund;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-5:1994;
Ausgabe: 1994-01

Teil 1-6 Allgemeine Regeln; Tragwerke aus unbewehrtem Beton;
Deutsche Fassung ENV 1992-1-6:1994;
Ausgabe: 1994-12
Teil 2 Betonbrücken;
Deutsche Fassung ENV 1992-2:1996;
Ausgabe: 1997-10

prEN 12350 **Prüfung von Frischbeton**

Teil 1 Sampling;
Ausgabe: 1999
Teil 2 Slump test;
Ausgabe: 1999
Teil 3 Vebe test;
Ausgabe: 1999
Teil 4 Verdichtungsmaß;
Ausgabe: 1999
Teil 5 Flow table test;
Ausgabe: 1999
Teil 6 Frischbetonrohdichte;
Ausgabe: 1999
Teil 7 Luftgehalt – Druckverfahren;
Ausgabe: 1999

prEN 12390 **Prüfung von Festbeton**

Teil 1 Form, Maß und andere Anforderungen für Probekörper und Formen;
Ausgabe: 1999
Teil 2 Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen;
Ausgabe: 1999
Teil 3 Druckfestigkeit von Probekörpern;
Ausgabe: 1999
Teil 4 Bestimmung der Druckfestigkeit;
Ausgabe: 1999
Teil 5 Biegezugfestigkeit von Probekörpern;
Ausgabe: 1999
Teil 6 Bestimmung der Spaltzugfestigkeit von Probekörpern;
Ausgabe: 1999
Teil 7 Bestimmung der Rohdichte von Festbeton;
Ausgabe: 1999

prEN 12504 **Prüfung von Beton in Bauwerken**

Teil 1 Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung von Druck;
Ausgabe: 1999

Teil 2 Zerstörungsfreie Prüfung – Bestimmung der Rückprallzahl;
Ausgabe: 1999

Teil 3 Bestimmung der Ausziehkraft;
Ausgabe: 1999

Putz und Mauerwerk

DIN 105 **Mauerziegel**

Teil 1 Vollziegel und Hochlochziegel;
Ausgabe: 1989-08

Teil 2 Leichthochlochziegel;
Ausgabe: 1989-08

Teil 3 Hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker;
Ausgabe: 1984-05

Teil 4 Keramikklinker;
Ausgabe: 1984-05

Teil 5 Leichtlanglochziegel und Leichtlangloch-Ziegelplatten;
Ausgabe: 1984-05

DIN 398 **Hüttensteine**

Vollsteine, Lochsteine, Hohlblocksteine;
Ausgabe: 1976-06

DIN 1053 **Mauerwerk**

Teil 1 Berechnung und Ausführung;
Ausgabe: 1996-11

Teil 2 Mauerwerksfestigkeitsklassen aufgrund von Eignungsprüfungen;
Ausgabe: 1996-11

Teil 3 Bewehrtes Mauerwerk; Berechnung und Ausführung;
Ausgabe: 1990-02

Teil 4 Mauerwerk; Bauten aus Ziegelfertigbauteilen;
Ausgabe: 1978-09

DIN 4165 **Porenbeton-Blocksteine und Porenbeton-Plansteine**

Ausgabe: 1996-11

DIN 18151 **Hohlblöcke aus Leichtbeton**

Ausgabe: 1987-09

E DIN 18151 Teil A1 Änderung A1:
Ausgabe: 1998-12

DIN 18152 **Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton**

Ausgabe: 1987-04

E DIN 18152 Teil A1 Änderung A1:
Ausgabe: 1998-12

DIN 18153 **Mauersteine aus Beton (Normalbeton)**

Ausgabe: 1989-09

E DIN 18153 Teil A1 Änderung A1:
Ausgabe: 1998-12

DIN 18550 **Putz**

Teil 1 Begriffe und Anforderungen;
Ausgabe: 1985-01

Teil 2 Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Ausführung;
Ausgabe: 1985-01

Teil 3 Wärmedämmputzsysteme aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag;
Ausgabe: 1991-03

Teil 4 Leichtputze; Ausführung;
Ausgabe: 1993-08

Mörtel und Estrich

DIN 1100 **Hartstoffe für zementgebundene Hartstoffestriche**

Ausgabe: 1989-10

DIN 2880 **Anwendung von Zementmörtel-Auskleidung für Gußrohre, Stahlrohre und Formstücke**

Ausgabe: 1999-01

DIN 18202 **Toleranzen im Hochbau – Bauwerke**

Ausgabe: 1997-04

DIN 18555 **Prüfung von Mörtel mit mineralischen Bindemitteln**

Teil 1 Allgemeines, Probenahme, Prüfmörtel;
Ausgabe: 1982-09

Teil 2 Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts;
Ausgabe: 1982-09

Teil 3 Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte;
Ausgabe: 1982-09

Teil 4 Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch;
Ausgabe: 1986-03

Teil 5 Festmörtel; Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln;
Ausgabe: 1986-03

Teil 6 Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit;
Ausgabe: 1987-11

Teil 7 Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach dem Filterplattenverfahren;
Ausgabe: 1987-11

Teil 8 Frischmörtel; Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Dünnbettmörteln für Mauerwerk;
Ausgabe: 1987-11

Teil 9 Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit;
Ausgabe: 1999-09

DIN 18557 **Werkmörtel**

Herstellung, Überwachung und Lieferung;
Ausgabe: 1997-11

DIN 18560 **Estriche im Bauwesen**

Teil 1 Begriffe, Allgemeine Anforderungen, Prüfung;
Ausgabe: 1992-05

Teil 2 Estriche und Heizestriche auf Dämmschichten (schwimmende Estriche);
Ausgabe: 1992-05

Teil 3 Verbundestriche;
Ausgabe: 1992-05

Teil 4 Estriche auf Trennschicht;
Ausgabe: 1992-05

Teil 7 Hochbeanspruchbare Estriche (Industrieestriche);
Ausgabe: 1992-05

Einpreßmörtel für Spannglieder

DIN EN 445 Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 445:1996; Ausgabe: 1996-07

DIN EN 446 Einpreßverfahren; Deutsche Fassung EN 446:1996; Ausgabe: 1996-07

DIN EN 447 Anforderungen für üblichen Einpreßmörtel; Deutsche Fassung EN 447:1996; Ausgabe: 1996-07

Straßen- und Tiefbau

DIN 483 **Bordsteine aus Beton**
Ausgabe: 1981-08

DIN 485 **Gehwegplatten aus Beton**
Ausgabe: 1987-04

DIN 4032 **Betonrohre und Formstücke; Maße, Technische Lieferbedingungen**
Ausgabe: 1981-01

DIN 4034 **Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen**

Teil 1 Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; Maße, Technische Lieferbedingungen; Ausgabe: 1993-09

Teil 2 Schächte für Brunnen- und Sickeranlagen; Maße, Technische Lieferbedingungen; Ausgabe: 1990-10

Teil 10 Schachtunterteile aus Mauerwerk für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; Anforderungen und Prüfungen; Ausgabe: 1995-10

E DIN 4034 Teil 100 Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; Ausgabe: 1999-07

DIN 4035 **Stahlbetonrohre und zugehörige Formstücke – Maße**
Technische Lieferbedingungen; Ausgabe: 1995-08

DIN 18501 **Pflastersteine aus Beton**

Ausgabe: 1982-11

DIN 52108 **Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe**

Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme; Schleifscheiben-Verfahren;
Ausgabe: 1988-08

prEN 1338 **Concrete paving blocks Requirements and test methods**

Pavès en bèton Prescription et mèthodes d'essai;
Ausgabe: 1999-09

prEN 1339 **Concrete paving flags Requirements and test methods**

Dalles en bèton pour revetement Prescription et mèthodes d'essai;
Ausgabe: 1999-09

prEN 1340 **Concrete kerb units Requirements and test methods**

Elèments pour bordures en bèton Precription et mèthodes d'essai;
Ausgabe: 1999-09

Allgemeines

DIN 4102 **Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen**

Teil 1 Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen;
Ausgabe: 1998-05

Teil 2 Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen;
Ausgabe: 1977-09

Teil 3 Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen;
Ausgabe: 1977-09

Teil 4 Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile;
Ausgabe: 1994-03

DIN 4108 **Wärmeschutz im Hochbau**

Teil 1 Größen und Einheiten;
Ausgabe: 1981-08

E DIN 4108 Teil 2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Mindestanforderungen an den Wärmeschutz;
Ausgabe: 1999-06

E DIN 4108 Teil 3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung;
Ausgabe: 1999-07

DIN V 4108 Teil 4 Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte;
Ausgabe: 1998-10

Teil 5 Berechnungsverfahren;
Ausgabe: 1981-08

DIN V 4108 Teil 6 Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden;
Ausgabe: 1995-04

DIN V 4108 Teil 7 Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen; Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele;
Ausgabe: 1996-11

E DIN 4108 Teil 20 Thermisches Verhalten von Gebäuden; Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik; Allgemeine Kriterien und Berechnungsalgorithmen (Vorschlag für eine Europäische Norm);
Ausgabe: 1995-07

E DIN 4108 Teil 21 Außenwände von Gebäuden; Luftdurchlässigkeit; Prüfverfahren (Vorschlag für eine Europäische Norm);
Ausgabe: 1995-11

DIN 4228 **Werksmäßig hergestellte Betonmaste**

Ausgabe: 1989-02

DIN 4232 **Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge**

Bemessung und Ausführung;
Ausgabe: 1987-09

DIN 7865 **Elastomer-Fugenbänder zur Abdichtung von Fugen in Beton**

Teil 1 Form und Maße;
Ausgabe: 1982-02

Teil 2 Werkstoff-Anforderungen und Prüfung;
Ausgabe: 1982-02

DIN 18200 **Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte – Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten**

Ausgabe: 2000-05

DIN 18540 **Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtstoffen**

Ausgabe: 1995-02

DIN 18541 **Fugenbänder aus thermoplastischen Kunststoffen zur Abdichtung von Fugen in Ortbeton**

Teil 1 Begriffe, Formen, Maße;
Ausgabe: 1992-11
Teil 2 Anforderungen, Prüfung, Überwachung;
Ausgabe: 1992-11

DIN 18551 **Spritzbeton**

Herstellung und Güteüberwachung;
Ausgabe: 1992-03

E DIN 18197 **Abdichten von Fugen in Beton mit Fugenbändern**

Ausgabe: 1995-12

DIN 28052 **Chemischer Apparatebau; Oberflächenschutz mit nichtmetallischen Werkstoffen für Bauteile aus Beton in verfahrenstechnischen Anlagen**

Teil 1 Begriffe, Auswahlkriterien;
Ausgabe: 1992-02
E DIN 28052 Teil 1 Begriffe und Auswahlkriterien;
Ausgabe: 1999-08
Teil 2 Anforderungen an den Untergrund;
Ausgabe: 1993-08

	Teil 3	Beschichtungen mit organischen Bindemitteln; Ausgabe: 1994-12
	Teil 4	Auskleidungen; Ausgabe: 1995-12
	Teil 5	Kombinierte Beläge; Ausgabe: 1997-04
E DIN 28052	Teil 6	Eignungsnachweis und Prüfungen; Ausgabe: 1999-05

DIN 31051 **Instandhaltung**

Instandhaltung; Begriffe und Maßnahmen; Ausgabe: 1985-01

DIN 55666 **Prüfung von Formaldehyd emittierenden Beschichtungen, Melaminschaumstoffen und Textilien**

Bestimmung der Ausgleichskonzentration an Formaldehyd in einem kleinen Prüfraum; Ausgabe: 1995-04

DIN 59220 **Flacherzeugnisse aus Stahl**

Warmgewalztes Blech mit Mustern – Maße, Gewichte, Grenzabmaße, Formtoleranzen und Grenzabweichungen der Masse; Ausgabe: 2000-04

DIN EN 1504 **Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken**

	Teil 1	Definitionen, Anforderungen, Güteüberwachung und Beurteilung der Konformität – Definitionen; Deutsche Fassung EN 1504-1:1998; Ausgabe: 1998-02
DIN V ENV 1504	Teil 9	Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität; Allgemeine Prinzipien für die Anwendung von Produkten und Systemen; Ausgabe: 1997-07
DIN V ENV 1504	Teil 10	Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität; Anwendung von Produkten und Systemen auf der Baustelle, Qualitätsüberwachung der Ausführung; Deutsche Fassung prEN 1504-10:1999; Ausgabe: 1999-10

prEN 1504

Products and systems for the protection and repair and of concrete structures

Teil 2 Definitions – Requirements – Quality control and evaluation of conformity; Surface protection systems
Ausgabe: 1999-03

Teil 3 Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity; Structural and non-structural repair
Ausgabe: 1999-03

Teil 4 Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity; Structural bonding
Ausgabe: 1999-02

Teil 5 Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity; Concrete injection
Ausgabe: 1999

Teil 6 Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity; Anchoring of reinforcing steel bar
Ausgabe: 1999-01

Teil 7 Corrosion protection of reinforcement

Teil 8 Sampling, Evaluation of Conformity, Marking and Labelling
Ausgabe: 1999-02

E DIN EN 1520

Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton

Deutsche Fassung prEN 1520:1994;
Ausgabe: 1994-10

DIN EN 10131

Kaltgewalzte Flacherzeugnisse mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen aus mikrolegierten Stählen

Technische Lieferbedingungen;
Deutsche Fassung EN 10268:1998;
Ausgabe: 1999-02

E DIN EN 12843

Vorgefertigte Betonmaste

Deutsche Fassung prEN 12843:1997;
Ausgabe: 1997-07

Umweltmanagement – Ökobilanz

DIN EN ISO 14040	Prinzipien und allgemeine Anforderungen (ISO 14040:1997); Deutsche Fassung EN ISO 14040:1997; Ausgabe: 1997-08
DIN EN ISO 14041	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz (ISO 14041:1998); Deutsche Fassung EN ISO 14041:1998; Ausgabe: 1998-11
E DIN EN ISO 14042	Wirkungsabschätzung (ISO/DIS 14042:1998); Deutsche Fassung prEN ISO 14042:1998; Ausgabe: 1999-02
E DIN EN ISO 14043	Auswertung (ISO/DIS 14043:1998); Deutsche Fassung prEN ISO 14043:1998; Ausgabe: 1999-01

Verfahrenstechnik

DIN 66145 **Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen**

RRSB-Netz
Ausgabe: 1976-04

2.2 Richtlinien

[Ri1] *Beton mit rezykliertem Zuschlag: Teil 1: Betontechnik ; Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand ; Ausgabe August 1998* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1998. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri2] *Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1996. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri3] *DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton): Eignungsprüfung, Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1995

[Ri4] *DAfStb-Richtlinie für Fließbeton: Herstellung, Verarbeitung und Prüfung* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1995

[Ri5] *DAfStb-Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1995

[Ri6] *DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton: Ergänzung zu DIN 1045/09.88 für die Festigkeitsklassen B 65 bis B 115; August 1995* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1995

[Ri7] *Ortbetonwände aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Zuschlag und geschäumtem Zementleim: Bemessung und Ausführung; Entwurf Mai 1996 (4. Entwurf), DAfStb-Richtlinie* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb, 1996

[Ri8] *Richtlinie für die Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1988

[Ri9] *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze; Teil 2: Bauplanung und Bauausführung* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1990. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri10] *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: Teil 3: Qualitätssicherung der Bauausführung* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb, 1991. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri11] *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: Teil 4: Qualitätssicherung der Bauprodukte* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1992. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri12] *Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau: DAfStb-Richtlinie* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb, 1996

[Ri13] *Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali Richtlinie): Teil 1: Allgemeines; Teil 2: Betonzuschlag mit Opalsandstein und Flint; Teil 3: Betonzuschlag aus präkambrischer Grauwacke oder anderen alkaliempfindlichen Gesteinen* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1997. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri14] *Vorläufige Empfehlung des DAfStb zur Vermeidung möglicher schädigender Alkalireaktionen bei Verwendung von Kies-Splitt und Kies-Edelsplitt des Oberrheins als Betonzuschlag* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1999-09. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri15] *Richtlinie zur Änderung von DIN 4227 Teil 1 – Spannbeton, Bauteile aus Normalbeton oder voller Vorspannung (Ausgabe 12.79)* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1985. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri16] *Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb
In: DBV-Rundschreiben Nr.112/1984, Anlage, 1984, 2 S.

[Ri17] *Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): Beuth, 1989

[Ri18] *Richtlinien für die Anwendung Europäischer Normen im Betonbau: Richtlinien zur Anwendung von Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teile 1-1, 1-3, 1-4, 1-5,1-6* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1995. – (DAfStb-Richtlinie)

[Ri19] *Recommendation on the heat treatment of concrete: Sep 89* / Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb German Committee on Reinforced Concrete, DAfStb (Hrsg.). – Berlin (u. a.): DIN Deutsches Institut für Normung, 1989

[Ri20] *Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C: Ausgabe 99/1*
In: Deutsches Institut für Bautechnik: Mitteilungen 30 (1999) Sonderheft 20, S.1-104

[Ri21] *Richtlinien für die Erteilung von Zulassungen für anorganische Betonzusatzstoffe (Zulassungsrichtlinien): – Fassung Juni 1993 –*
In: Institut für Bautechnik; Mitteilungen 24 (1993) 4, S. 122–132

[Ri22] *Richtlinien für die Überwachung von anorganischen Betonzusatzstoffen (Überwachungsrichtlinien): – Fassung Juni 1993 –*
In: Institut für Bautechnik: Mitteilungen 24 (1993) 4, S. 132–136

[Ri23] *Richtlinien für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel (Zulassungsrichtlinien): – Fassung Juni 1993 –*
In: Institut für Bautechnik: Mitteilungen 24 (1993) 5, S. 162–173

[Ri24] *Richtlinien für die Überwachung von Betonzusatzmitteln (Überwachungsrichtlinien) – Fassung Dezember 1996*
In: Deutsches Institut für Bautechnik: Mitteilungen 28 (1997) 5, S. 137–143

[Ri25] *Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1989 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG)*
In: Europäische Gemeinschaften: Amtsblatt L (1989) 40, S. 12–26

[Ri26] *Grundlagendokumente zur Bauproduktenrichtlinie: Deutsch / englisch / französisch: Grundlagendokumente der Richtlinie des Rates 89/106/EWG* / / <Zsgest. v.>: Meyer, H. G. – Berlin (u. a.): Beuth, 1994. – ISBN 3-410-13182-5

[Ri27] *Richtlinie 88/379/EWG des Rates vom 7. Juni 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Zubereitungen*
In: Europäische Gemeinschaften: Amtsblatt L (1988) 187, S. 14 ff

[Ri28] *Richtlinie 91/155/EWG der Kommission vom 5. März 1991 zur Festlegung der Einzelheiten eines besonderen Informationssystems für gefährliche Zubereitungen gemäß Artikel 10 der Richtlinie 88/379/EWG des Rates*
In: Europäische Gemeinschaften: Amtsblatt L (1991) 76, S. 35 ff

[Ri29] *ZTV-K Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten: Ausgabe 1996* / Bundesministerium f. Verkehr, Abteilung Straßenbau Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Ausgabe 1996 Aufl. – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1996

[Ri30] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen auf Beton: Teil 1: Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn – ZTV-BEL-B Teil 1* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: FGSV-Verl., 1999. – (FGSV 783/1)

[Ri31] *Technische Lieferbedingungen für die Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn zur Herstellung von Brückenbelägen auf Beton nach den ZTV-BEL-B Teil 1 (TL-BEL-B Teil 1). Technische Prüfvorschriften für Brückenbeläge auf Beton mit Dichtungsschicht aus einer Bitumen-Schweißbahn nach den ZTV-BEL-B Teil 1 (TP-BEL-B Teil 1): Ausgabe 1999* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: FGSV Verl., 1999. – (FGSV 783/2/3)

[Ri32] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen auf Beton, Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff, ZTV-BEL-B Teil 3, Technische Lieferbedingungen für Baustoffe zur Herstellung von Brückenbelägen auf Beton mit Dichtungsschicht nach ZTV-BEL-B, Teil 3, TL-BEL-B Teil 3, Ausgabe 1995* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1995

[Ri33] *Technische Prüfvorschriften für Baustoffe zur Herstellung von Brückenbelägen auf Beton mit Dichtungsschicht nach ZTV-BEL-B, Teil 3: TP-BEL-B Teil 3 ; Ausgabe 1995* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1995. – (FGSV 781)

[Ri34] *Technische Lieferbedingungen für Reaktionsharze für Grundierungen, Versiegelungen und Kratzspachtelungen unter Asphaltbelägen auf Beton – TL-BEL-EP, Technische Prüfvorschriften für Reaktionsharze für Grundierungen, Versiegelungen und Kratzspachtelungen unter Asphaltbelägen auf Beton: TP-BEL-EP: Ausgabe 1999* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1999

[Ri35] *ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: FGSV-Verl., i. Vorber.

[Ri36] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: ZTV-SIB 90* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1990

[Ri37] *Technische Lieferbedingungen für im Spritzverfahren aufzubringende Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz – TL BE-SPCC, Technische Prüfvorschriften für im Spritzverfahren aufzubringende Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz – TP BE-SPCC: Ausgabe 1990* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1990

[Ri38] *Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (PCC) – TL BE-PCC, Technische Prüfvorschriften für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (PCC) – TP BE-PCC: Ausgabe 1990* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1990.

[Ri39] *Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Reaktionsharz-mörtel/Reaktionsharzbeton (PC) – TL BE-PC, Technische Prüfvorschriften für Betonersatzsysteme aus Reaktionsharzmörtel/Reaktionsharzbeton (PC) – TP BE-PC: Ausgabe 1990* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1990

[Ri40] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonteilen: ZTV-Riss 93* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1993

[Ri41] *Technische Lieferbedingungen für Füllgut aus Epoxidharz und zugehöriges Injektionsverfahren – TL FG-EP. Technische Prüfvorschriften für Füllgut aus Epoxidharz und zugehöriges Injektionsverfahren – TP FG-EP: Ausgabe 1993* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1993

[Ri42] *Technische Lieferbedingungen für Füllgut aus Polyurethan und zugehöriges Injektionsverfahren – TL FG-PUR. Technische Prüfvorschriften für Füllgut aus Polyurethan und zugehöriges Injektionsverfahren – TP FG-PUR: Ausgabe 1993* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1993

[Ri43] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215): Ausgabe 1998 ; EU-Notifizierung Nr. 98/140/D vom 30. 3. 1998* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Binnenschiffahrt und Wasserstraßen (Hrsg.). – Hannover: Wasser- und Schiffahrtsdirektion Mitte, Drucksachenstelle, 1998

[Ri44] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219): EU-Notifizierung Nr. 97/6/D ; Ausgabe 1997* / Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Binnenschiffahrt und Wasserstr. (Hrsg.). – Hannover: , 1997. – (Standardleistungskatalog für den Wasserbau 2.191.997)

[Ri45] *Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau: TL Min-Stb 94* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Ri46] *Richtlinien für die Gütеüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau: RG Min-StB 93 ; Ausgabe 1993* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1993

[Ri47] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt: ZTV Asphalt – StB 94* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Ri48] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton: ZTV Beton – StB 93* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Ausg. 1993 Aufl. – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1993

[Ri49] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton: ZTV Beton - StB 2000* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, i. Vorber.

[Ri50] *Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln: TP HGT-StB 94 ; Ausgabe 1994* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Ri51] *Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel: TL NBM-StB 92* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1992

[Ri52] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau: ZTVT-StB 95; Ausgabe 1995* / Bundesministerium f. Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1995

[Ri53] *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-90* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1990

[Ri54] *TL OS, Technische Lieferbedingungen für Oberflächenschutzsysteme. TP OS, Technische Prüfvorschriften für Oberflächenschutzsysteme: Ausgabe 1996* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1996

[Ri55] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinie für Erdarbeiten im Straßenbau: ZTVE-StB 94* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Ri56] *ZTV-Tunnel: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln; Teil 1: Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise); Ausgabe 1995* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1995

[Ri57] *ZTV-Tunnel: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln; Teil 2: Offene Bauweise ; Ausgabe 1999* / Bundesminister f. Verkehr, Abt. Straßenbau (Hrsg.). – Dortmund: Verkehrsblatt-Verl., 1999

[Ri58] *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen: RStO 86* / Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1986

[Ri59] *Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen für Bohrpfahlgründungen und Stahlpfosten von Lärmschutzwänden an Straßen: Ergänzungen zu den Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen (ZTV-Lsw 88); Ausgabe 1997* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1997

[Ri60] *Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen: Teil Wasserwirtschaftliche Verträglichkeit* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994. – (FGSV-Arbeitspapier 28/1)

[Ri61] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen (ZTV-PS 98): Ausgabe 1998* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.). – Köln: FGSV-Verl., 1998

[Ri62] *Technische Lieferbedingungen für Betonschutzwand-Fertigteile TL BSWF 96: Ausgabe 1996* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV FGSV, Arbeitsgruppe f. Straßen- und Verkehrswesen FGSV (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1996. – (FGSV 362)

[Ri63] *Guß- und Stahlrohrleitungsteile mit ZM-Auskleidung: Handhabung* / Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW (Hrsg.). – Bonn: Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW, 1995. – (DVGW-Regelwerk: Technische Regel, Arbeitsblatt W 346)

[Ri64] *Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich: Prüfung und Bewertung* / Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW (Hrsg.). – Bonn: Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW, 1999. – (DVGW-Regelwerk: Technische Regel, Arbeitsblatt W 347)

[Ri65] *Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich: Prüfung und Bewertung* / Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW (Hrsg.). – Bonn: Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW, 1998. – (DVGW-Regelwerk: Technische Regel, Arbeitsblatt W 270)

[Ri66] *FZM-Ummantelung zum mechanischen Schutz von Stahlrohren und -formstücken mit Pololefinumhüllung: Anforderungen und Prüfung, Nachumhüllung und Reparatur; Hinweise zur Verlegung und zum Korrosionsschutz* / Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW (Hrsg.). – Bonn: Dt. Verein des Gas- u. Wasserfaches, DVGW, 1999. – (DVGW-Regelwerk: Technische Regel, Arbeitsblatt W 340)

[Ri67] *Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage: ATV Arbeitsblatt A 115* / Abwassertechnische Vereinigung, ATV (Hrsg.). – Hennef: Ges. z. Förderung d. Abwassertechnik, GFA, 1994. – (ATV Arbeitsblatt A 115)

[Ri68] *Gesundheitliche Beurteilung von Kunststoffen und anderen nichtmetallischen Werkstoffen im Rahmen des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes für den Trinkwasserbereich (KTW-Empfehlungen): 1. Mitteilung* / Bundesgesundheitsamt, Kunststoffkommission In: Bundesgesundheitsblatt 20 (1977) , S. 10–13, 56–61

[Ri69] *Richtlinie Recycling-Baustoffe: Eigenschaften, Anforderungen, Prüfungen und Überwachungen; Ausgabe 1996* / Bundesverband der Deutschen Recycling-Baustoff-Ind., BRB (Hrsg.). – Duisburg: Bundesverband der Deutschen Recycling-Baustoff-Ind., BRB, 1996

[Ri70] *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln –: Stand: 6.November 1997* / Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, LAGA (Hrsg.). – 4. erw. Aufl. Aufl. – Berlin: E. Schmidt, 1998. – (LAGA-Mitteilungen 20). – ISBN 3-503-05011-6

2.3 Merkblätter

[Me1] *Sicheres Arbeiten beim Umgang mit Heißmehl* / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.). – Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, 1995. – (Aus der Gemeinschaftsarbeit – Für die Praxis 3)

[Me2] *Merkblatt für die Anwendung des Betonmischens mit Dampfzuführung: Fassung Juni 1974*
In: Beton 24 (1974) 9, S. 344–346

[Me3] *Korrosion von Abwasseranlagen – Abwasserableitung: Juli 1998* / Abwassertechnische Vereinigung, ATV (Hrsg.). – Hennef: Ges. z. Förderung d. Abwassertechnik, GFA, 1998. – (ATV Merkblatt M168)

[Me4] *Abstandhalter* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1997 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1997. – (DBV-Merkblatt)

[Me5] *Begrenzung der Rißbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me6] *Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1992 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me7] *Beschichten von Stahlbeton-Schornsteinen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1983 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me8] *Beton für massige Bauteile* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me9] *Betondeckung und Bewehrung* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1997 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1997. – (DBV-Merkblatt)

[Me10] *Betonierbarkeit von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me11] *Chloride im Beton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Sachstandbericht)

[Me12] *Fugendichtungen im Hochbau: Anforderungen für die Anwendung von konstruktiven Fugendichtungen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1976 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me13] *Gleitbauverfahren* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1987 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me14] *Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1991 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me15] *Kunststoffmodifizierter Spritzbeton/Spritzmörtel* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1991 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me16] *Nicht geschalte Betonoberfläche* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me17] *Rückbiegen von Betonstahl und Anforderungen an Verwahrkästen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me18] *Sichtbeton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1997 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1997. – (DBV-Merkblatt)

[Me19] *Strahlenschutzbetone* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1978 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me20] *Technische Lieferbedingungen für Kunststoffe für Spritzbeton/Spritzmörtel* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1991 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me21] *Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1992 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me22] *Trennmittel für Beton – Teil A:: Hinweise zur Auswahl und Anwendung* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1997 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1997. – (DBV-Merkblatt)

[Me23] *Vergußmörtel* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1990 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me24] *Verpreßte Injektionsschläuche für Arbeitsfugen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me25] *Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me26] *Zugabewasser für Beton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1982 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Merkblatt)

[Me27] *Beschränkung von Temperaturrissen im Beton* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Sachstandsbericht)

[Me28] *Betonoberfläche – Betonrandzone* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Sachstandsbericht)

[Me29] *Faserbeton mit synthetischen organischen Fasern* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. 1990 red. überarb. 1996 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1996. – (DBV-Sachstandsbericht)

[Me30] *Glasfaserbeton für Fertigteile* / Deutscher Beton-Verein, DBV – In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 329, 1982, S. 3–9

[Me31] *Sachstandbericht „Massenbeton"* / Deutscher Beton-Verein, DBV – In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton / Schriftenreihe; H. 329, 1982, S. 3–9

[Me32] *Quellfähige Fugeneinlagen für Arbeitsfugen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. : 1999 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1999. – (DBV-Sachstandbericht)

[Me33] *Unterstützungen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. ; 1998 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1998. – (DBV-Merkblatt)

[Me34] *Unterwasserbetone* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. : 1999 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1999. – (DBV-Merkblatt)

[Me35] *Betonschalungen: Hinweise zur Bemessung, baulichen Durchbildung sowie zum Ausrüsten und Ausschalen* / Deutscher Beton-Verein, DBV (Hrsg.). – Ausg. ; 1999 Aufl. – Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, DBV, 1999. – (DBV-Merkblatt)

[Me36] *Zementarten und ihre Herstellung* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 1)

[Me37] *Zuschlag für Normalbeton: Arten, Anforderungen, Prüfungen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 2)

[Me38] *Betonzusätze: Zusatzmittel und Zusatzstoffe* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 3)

[Me39] *Frischbeton: Eigenschaften und Prüfungen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 4)

[Me40] *Beton B I – Beton B II* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 5)

[Me41] *Transportbeton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 6)

[Me42] *Bereiten und Verarbeiten des Betons* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 7)

[Me43] *Nachbehandeln von Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 8)

[Me44] *Betone mit besonderen Eigenschaften* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 9)

[Me45] *Strahlenschutzbeton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1993. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 10)

[Me46] *Massenbeton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1993. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 11)

[Me47] *Unterwasserbeton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 12)

[Me48] *Leichtbeton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 13)

[Me49] *Mauermörtel* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 17)

[Me50] *Risse im Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 18)

[Me51] *Zementestrich* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 19)

[Me52] *Instandsetzungsmörtel* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1996. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 20)

[Me53] *Arbeitsfugen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 22)

[Me54] *Unbewehrte Bauteile aus Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 23)

[Me55] *Betonstahl und Verlegen der Bewehrung* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 24)

[Me56] *Rißbewehrung: Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rißbreite bei wasserundurchlässigen Bauteilen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 25)

[Me57] *Füllen von Rissen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Betontechnik 26)

[Me58] *Baulicher Brandschutz mit Beton: Hinweise zur brandschutztechnischen Bemessung* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1995. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 1)

[Me59] *Begrünte Dächer* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 2)

[Me60] *Flachdächer aus Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 3)

[Me61] *Wärmedämmputz* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 4)

[Me62] *Keller – richtig gebaut* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 5)

[Me63] *Dachparkflächen mit Wärmedämmung* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 6)

[Me64] *Putz* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 7)

[Me65] *Sichtbeton. Gestaltung von Betonoberflächen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 8)

[Me66] *Schalung für Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 9)

[Me67] *Keller im Grundwasser: Grundsätze der Planung und Ausführung* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 10)

[Me68] *Sichtmauerwerk aus Beton (Normalbeton)* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Hochbau 11)

[Me69] *Betonfahrbahndecken für Straßen und Wege* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 1)

[Me70] *Verfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln im Straßenbau* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 3)

[Me71] *Hydraulisch gebundene Tragschicht HGT* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 4)

[Me72] *Walzbeton für Tragschichten und Tragdeckschichten* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1997. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 6)

[Me73] *Recycling von Straßenaufbruch* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 12)

[Me74] *Zementverfestigung von industriellen Nebenprodukten für den Straßen- und Wegebau* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1994. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 13)

[Me75] *Betondecken im kommunalen Straßenbau* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 16)

[Me76] *Betonsteinpflaster und Tragschicht als System* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 17)

[Me77] *Herstellung dichter Abfüllplätze aus Beton an Tankstellen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 18)

[Me78] *Wirtschaftswege aus Beton* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1994. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 19)

[Me79] *Wegebau mit hydraulisch gebundener Tragdeckschicht* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1994. – (Zement-Merkblatt: Straßenbau 21)

[Me80] *Betonböden für Hallen und Freiflächen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Tiefbau 1)

[Me81] *Auffangbauwerke: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Tiefbau 2)

[Me82] *Sulfide in Abwasseranlagen: Ursachen – Auswirkungen – Gegenmaßnahmen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1999. – (Zement-Merkblatt: Tiefbau 3)

[Me83] *Ortbeton für Tunnelinnenschalen* / Bauberatung Zement (Hrsg.). – Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, BDZ, 1998. – (Zement-Merkblatt: Tiefbau 4)

[Me84] *Merkblatt Bauwerksabdichtungen mit kaltverarbeitbaren, kunststoffmodifizierten Beschichtungsstoffen auf Basis von Bitumenemulsionen: Juni 1992* / Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel, IBH (Hrsg.). – Frankfurt/M.: Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel, IBH, 1992

[Me85] *Merkblatt Bauwerksabdichtungen mit zementgebundenen starren und flexiblen Dichtungsschlämmen: März 1992* / Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel, IBH (Hrsg.). – 2. überarb. Ausg. Aufl. – Frankfurt/M.: Industrieverband Bauchemie und Holzschutzmittel, IBH, 1992

[Me86] *Merkblatt für die Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton: MEB* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Me87] *Merkblatt für Flächenbefestigungen mit Pflaster und Plattenbelägen: Ausgabe 1989* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1989

[Me88] *Merkblatt über den Rutschwiderstand von Pflaster und Plattenbelägen für den Fußgängerverkehr* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1997

[Me89] *Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau: Teil: Nebengestein der Steinkohle* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau" (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1984

[Me90] *Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau: Teil: Wiederverwendung von Baustoffen* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau" (Hrsg.) – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1985

[Me91] *Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau: Teil: Steinkohlenflugasche* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau" (Hrsg.).- Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1986

[Me92] *Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau: Teil: Schmelzkammergranulat* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau" (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1984

[Me93] *Merkblatt zur Wiederverwendung von Beton aus Fahrbahndecken. Ausgabe 1998* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. für das Straßen- u. Verkehrswesen, Wien, 1998

[Me94] *Sichtbetonflächen von Fertigteilen aus Beton und Stahlbeton: Merkblatt* / Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau, FDB (Hrsg.). – Bonn: Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau, FDB, 1999

[Me95] *Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln: Ausgabe 1997* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1997

[Me96] *Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton: mit Anhang Anleitung für die Herstellung und Verarbeitung von Transportbeton mit Luftporen ; Ausgabe 1991* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1991

[Me97] *Merkblatt für die Verwendung von Ausbauasphalt und pechhaltigem Straßenaufbruch in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln. Ausgabe 1994* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1994

[Me98] *Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen: Ausgabe 1998* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsausschuß Kommunaler Straßenbau (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1998

[Me99] *Merkblatt für den Bau von Flugbetriebsflächen aus Beton* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, i. Vorber.

[Me100] *Merkblatt für den Bau von Tragschichten und Tragdeckschichten mit Walzbeton für Verkehrsflächen: Ausgabe 1993* / Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV Arbeitsgruppe Betonstraßen (Hrsg.). – Köln: Forschungsges. f. Straßen- u. Verkehrswesen, FGSV, 1993

[Me101] *Merkblatt für Dränbetontragschichten (DBT): Ausgabe 1996* / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV (Hrsg.). – Köln: FGSV-Verl., 1996

2.4 Gesetze und Verordnungen

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen: Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe – VwVwS ; vom 17. Mai 1999
In: Bundesanzeiger (1999) 98a,

Gesetz über das Inverkehrbringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte und anderer Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaften (Bauproduktengesetz – BauPG): Neufassung vom 28. April 1998
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1998) 63, S. 812 ff.

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV): Vom 12. Juli 1999
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1999) , S. 1554 ff.

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG): vom 17. März 1998
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1998) , S. 502 ff.

Gesetz über den Verkehr mit Lebensmitteln, Tabakerzeugnissen, kosmetischen Mitteln und sonstigen Bedarfsgegenständen: Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz – LMBG , Bekanntmachung der Neufassung vom 9. September 1997
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt (1997) 63, S. 2296–2319

Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit: Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG vom 7. August 1996
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt (1996) 43, S. 1246 ff.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG): Vom 27. September 1994
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1994) , S. 2705 ff.

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, Wasserhaushaltsgesetz – WHG: Fassung vom 12. November 1996
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1996) , S. 1695 ff.

Gesundheitliche Beurteilung von Kunststoffen und anderen nichtmetallischen Werkstoffen im Rahmen des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes für den Trinkwasserbereich: 1. Mitteilung / Bundesgesundheitsamt, Kunststoffkommission
In: Bundesgesundheitsblatt 20 (1977) , S. 10–13, 56–61

Muster-Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA):

Muster-VAwS ; Stand 8./9. November 1990 / Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA (Hrsg.). –: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA, 1990

Musterbauordnung für die Länder der Bundesrepublik Deutschland: Fassung gemäß Beschluß vom 11. Dezember 1992 der Arbeitsgemeinschaft der für das Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesen zuständigen Minister der Länder (ARGEBAU) / Böckenförde, Dieter Temme, Heinz-Georg Krebs, Winnifred (Hrsg.). – 3. Aufl.- Düsseldorf: Werner, 1993. – ISBN 3-8041-4063-7

Richtlinie 67/548/EWG des Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe
In: Europäische Gemeinschaften: Amtsblatt L (1967) 196, S. 1 ff.

Richtlinie des Rates 76/769/EWG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen: vom 27. Juli 1976
In: Europäische Gemeinschaften: Amtsblatt L (1976) 262, S.201 ff.

Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz: Chemikalien-Verbotsverordnung – ChemVerbotsV ; In der Fassung vom 19. Juli 1996
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1996) , S. 1151 ff.

Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV): Neufassung vom 15. November 1999
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1999) , S. 2233 ff.

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge: Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG: Fassung vom 14. Mai 1990
In: Bundesrepublik Deutschland: Bundesgesetzblatt I (1990) , S. 880 ff.

TRGS 613 – Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkungen für chromathaltige Zemente und chromathaltige zementhaltige Zubereitungen
In: Bundesarbeitsblatt (1999) 7–8, S. 45–47

2.5 Ausländische Normen und Richtlinien

CEB-FIP Model Code 1990: Design code / Comité Euro-International du Béton, CEB (Hrsg.). – London: Thomas Telford Ltd., 1993. – (Comité Euro-International du Béton: Bulletin d'information 213/214). – ISBN 0-7277-1696-4

Cold weather concreting / / <Reported by>. ACI Committee 306. – Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1989. – (ACI committee reports 306R-88)

Recommended Practice for Hot Weather Concreting (ACI 305-72)
In: Journal of the American Concrete Institute: Proceedings 69 (1972) 5, S. 261

RILEM – Richtlinien für das Betonieren im Winter / Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matèriaux et les Constructions
In: Beton 14 (1964) 10, S. 411–427

RILEM *TC 119-TCE: Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages: TCE 1: Adiabatic and semi-adiabatic calorimetry to determine the temperature increase in condrete due to hydration heat of the cement ; TCE 2: Metod for in situ measurement of thermal stress in concrete using the stress meter ; TCE 3: Testing of the cracking tendency of concrete at early ages using the cracking frame test*
In: Materials and Structures 30 (1997) 202, S. 451–464

ASTM C 418 1998. *Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting.*

ASTM C 779 1995. *Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces.*

ASTM C 173 1994. *Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the volumetric method.*

ASTM C 535 1996. *Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.*

ASTM C 131 1996. *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.*

3 Allgemeine und bautechnische Tafeln

Tafel IV.3-1: Expositionsklassen nach E DIN 1045 (Beton ohne Bewehrung/Bewehrungskorrosion)

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
1 Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko		
Für Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht betonangreifender Umgebung kann die Expositionsklasse X0 zugeordnet werden.		
X0	alle Umgebungsbedingungen außer XF, XA und XM	Fundamente ohne Bewehrung ohne Frost Innenbauteile ohne Bewehrung
2 Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung		
Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
ANMERKUNG: Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.		
XC1	trocken	Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden)
XC2	nass, selten trocken	Gründungsbauteile, Teile von Wasserbehältern
XC3	mäßige Feuchte	Bauteile, zu denen die Außenluft häufig oder ständig Zugang hat, z. B. offene Hallen, Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit, z. B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäschereien, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung

Tafel IV.3-1 (Fortsetzung)

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)

3 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride

Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:

XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen, Einzelgaragen
XD2	nass, selten trocken	Solebäder, Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; Parkdecks

4 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser

Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:

XS1	salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser	Außenbauteile in Küstennähe
XS2	unter Wasser	Bauteile in Hafenanlagen, die ständig unter Wasser liegen
XS3	Tidebereiche, Spritzwasser- und Sprühnebelbereiche	Kaimauern in Hafenanlagen

Tafel IV.3-2: Expositionsklassen nach E DIN 1045 (Betonkorrosion)

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
5 Betonkorrosion durch Frost ohne und mit Taumittel		
Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Betonbauteile im Sprühnebel- und Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4 Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumitteln behandelt werden überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen Räumerlaufbahnen von Kläranlagen Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone

Tafel IV.3-2 (Fortsetzung)

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
6 Betonkorrosion durch chemischen Angriff		
Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser, Meerwasser nach Tafel IV.3-3 und Abwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
XA1	chemisch schwach angreifende Umgebung nach Tafel IV.3-3	Behälter von Kläranlagen Güllebehälter
XA2	chemisch mäßig angreifende Umgebung nach Tafel IV.3-3 und Meeresbauwerke	Betonbauteile, die mit Meerwasser in Berührung kommen Bauteile in betonangreifenden Böden nach Tafel IV.3-3, Spalte 4
XA3	chemisch stark angreifende Umgebung nach Tafel IV.3-3	Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern nach Tafel IV.3-3, Spalte 5 Gärfuttersilos und Futtertische der Landwirtschaft Kühltürme mit Rauchgasableitung
7 Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung		
Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
XM1	mäßige Verschleißbeanspruchung	Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge
XM2	schwere Verschleißbeanspruchung	Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler
XM3	extreme Verschleißbeanspruchung	Verkehrsflächen mit sehr schwerer Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; Beläge, die häufig mit Kettenfahrzeugen befahren werden; direkt befahrene Räumerlaufbahnen Wasserbauwerke in geschiebebelasteten Gewässern, Tosbecken

Tafel IV.3-3: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff

Die folgende Klasseneinteilung chemisch angreifender Umgebungen gilt für natürliche Umgebungen mit einer Wasser-/Bodentemperatur zwischen 5 °C und 25 °C und einer Fließgeschwindigkeit des Wassers, die klein genug ist, um näherungsweise hydrostatische Bedingungen anzunehmen. Bis auf die Grenzwerte der Tabellen 4 und 5 in DIN 4030-1 sind die Ausführungen in DIN 4030-1 zu beachten.
Für die Beurteilung ist der höchste Angriffsgrad maßgebend, auch wenn er nur von einem der Werte erreicht wird. Liegen zwei oder mehrere Werte im oberen Viertel eines Bereiches (bei pH im unteren Viertel), so erhöht sich der Angriffsgrad um eine Stufe (ausgenommen Meerwasser und Niederschlagswasser).
Die angreifenden Merkmale sind nach den in dieser Tabelle angegebenen Prüfverfahren zu bestimmen.

Chemisches Merkmal	Prüfverfahren	XA1	XA2	XA3
SO_4^{2-} mg/l in Wasser	DIN EN 196-2 oder DIN 4030-2	≥200 und ≤600	>600 und ≤3000	>3000 und ≤6000
SO_4^{2-} mg/kg im Boden[1] insgesamt	DIN EN 196-2[2]	≥2000 und ≤3000[3]	>3000[3] und ≤12 000	>12 000 und ≤24 000
pH-Wert des Wassers	DIN 4030-2	≤6,5 und ≥5,5	<5,5 und ≥4,5	<4,5 und ≥4,0
Säuregrad des Bodens in ml/kg	DIN 4030-2	>200 nach Baumann-Gully		
CO_2 mg/l kalklösend im Wasser	DIN 4030-2	≥15 und ≤40	>40 und ≤100	>100
NH_4^+ mg/l in Wasser[4]	ISO 7150-1, -2 oder DIN 4030-2	≥15 und ≤30	>30 und ≤60	>60 und ≤100
Mg^{2+} mg/l in Wasser	ISO 7980 oder DIN 4030-2	≥300 und ≤1000	>1000 und ≤3000	>3000

[1] Tonböden mit einer Durchlässigkeit von weniger als 10^{-4} m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden.
[2] Das Prüfverfahren beschreibt die Auslaugung von SO_4^{2-} durch Salzsäure; Wasserauslaugung darf statt dessen angewandt werden, wenn am Ort der Verwendung des Betons Erfahrung hierfür vorhanden ist.
[3] Falls die Gefahr der Anhäufung von Sulfationen im Beton – zurückzuführen auf wechselndes Trocknen und Durchfeuchten oder kapillares Saugen – besteht, ist der Grenzwert von 3000 mg/kg auf 2000 mg/kg zu vermindern.
[4] Gülle kann unabhängig vom NH_4-Gehalt in die Expositionsklasse XA1 eingeordnet werden.

Tafel IV.3-4: Ausbreitmaß-Klassen

Klasse	Ausbreitmaß (Durchmesser) in mm	Konsistenzbereich
F1	≤340	steif
F2	350 bis 410	plastisch
F3	420 bis 480	weich
F4	490 bis 550	sehr weich
F5	560 bis 620	fließfähig
F6	≥630	sehr fließfähig

Tafel IV.3-5: Verdichtungsmaß-Klassen

Klasse	Verdichtungsmaß	Konsistenzbereich
C0	≥1,46	sehr steif
C1	1,45 bis 1,26	steif
C2	1,25 bis 1,11	plastisch
C3	1,10 bis 1,04	weich

Tafel IV.3-6: Setzmaß-Klassen

Klasse	Setzmaß in mm
S1	10 bis 40
S2	50 bis 90
S3	100 bis 150
S4	160 bis 210
S5	≥220

Tafel IV.3-7: Setzzeit-Klassen (Vébé)

Klasse	Setzzeit in s
V0	≥31
V1	30 bis 21
V2	20 bis 11
V3	10 bis 6
V4	5 bis 3

Tafel IV.3-8: Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton

Festigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}$ in N/mm²	$f_{ck,cube}$ in N/mm²
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105[1)]	90	105
C 100/115[1)]	100	115

[1)] Für Beton der Festigkeitsklassen C 90/105 und C 100/115 bedarf es weiterer auf den Verwendungszweck abgestimmter Nachweise.

Tafel IV.3-9: Druckfestigkeitsklassen für Leichtbeton

Festigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}$ in N/mm²	$f_{ck,cube}$ in N/mm²
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77[1)]	70	77
LC 80/88[1)]	80	88

[1)] Für Leichtbeton der Festigkeitsklassen LC 70/77 und LC 80/88 bedarf es weiterer auf den Verwendungszweck abgestimmter Nachweise.

Tafel IV.3-10: Klasseneinteilung von Leichtbeton nach der Rohdichte

Rohdichteklasse	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Rohdichte in kg/m³	≥800 und ≤1000	>1000 und ≤1200	>1200 und ≤1400	>1400 und ≤1600	>1600 und ≤1800	>1800 und ≤2000

Tafel IV.3-11: Festigkeitsentwicklung von Beton bei 20 °C

Festigkeitsentwicklung	Schätzung des Festigkeitsverhältnisses $f_{cm,2}/f_{cm,28}$*)
schnell	≥0,50
mittel	≥0,30 bis <0,50
langsam	≥0,15 bis <0,30
sehr langsam	<0,15

*) Verhältnis mittlere Druckfestigkeit nach 2 Tagen zur mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen bzw. zur mittleren Druckfestigkeit bei einem anderen Termin (z. B. 56 Tage)

Tafel IV.3-12: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt ab der Betonfestigkeitsklasse C 60/75 und LC 55/60 bei allen Expositionsklassen

1	2
Gehalt an Zement in kg/m³	höchstzulässiger Gehalt in kg/m³ an Mehlkorn bei einer Prüfkorngröße von 0,125 mm
≤400	500
450	550
≥500	600

Tafel IV.3-13: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton mit einem Größtkorn des Zuschlaggemisches von 16 bis 63 mm bis zur Betonfestigkeitsklasse C 55/67 und LC 50/55 bei den Expositionsklassen XF und XM[1)]

1	2
Gehalt an Zement in kg/m³	höchstzulässiger Gehalt in kg/m³ an Mehlkorn bei einer Prüfkorngröße von 0,125 mm
≤300	400
350	450

[1)] Der höchstzulässige Mehlkorngehalt für alle anderen Expositionsklassen beträgt 550 kg/m³

Tafel IV.3-14: Definition der E DIN 1045-2

Äquivalenter Wasserzementwert w/z(eq): Masse des wirksamen Wassers bezogen auf die Masse des als wirksam geltenden Bindemittels (Bindemittel ≙ Zement + Zusatzstoff × Anrechenbarkeitsfaktor).

Baustellenbeton: Beton, der auf der Baustelle durch den Verwender für den Eigenverbrauch hergestellt wird.

Beton: Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement, grobem und feinem Zuschlag und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln. Er erhält seine Eigenschaften durch das Erhärten des Zementleims.

Beton nach Eigenschaften: Beton, bei dem die geforderten Eigenschaften und zusätzlichen Anforderungen dem Hersteller gegenüber festgelegt sind, wobei der Hersteller für die Bereitstellung eines Beton, der den geforderten Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist.

Beton nach Zusammensetzung: Beton, bei dem die Zusammensetzung des Betons und die zu verwendenden Ausgangsstoffe dem Hersteller gegenüber festgelegt sind und bei welchem der Hersteller für die Bereitstellung eines Beton mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist.

Betonfamilie: eine Gruppe von Betonzusammensetzungen, für die ein verlässlicher Zusammenhang zwischen maßgebenden Eigenschaften festgelegt und dokumentiert ist.

Betonfertigteile: Bauteil, das nicht in seiner endgültigen Lage, sondern in einem Werk oder an anderer Stelle mit einem entsprechenden Schutz vor Witterungseinflüssen hergestellt wird. Soweit kein Schutz vor ungünstigen Witterungsbedingungen besteht, gelten für die Fertigteile die Regeln für Ortbeton.

Charakteristische Festigkeit: Festigkeitswert, den erwartungsgemäß 5% der Grundgesamtheit aller möglichen Festigkeitsmessungen der Menge des betrachteten Betons, z. B. im Beurteilungszeitraum, unterschreiten.

Erstprüfung: Prüfung, die bei Produktionsbeginn einer neuen Betonsorte oder einer Produktionseinrichtung als erste Prüfung unter Protuktionsbedingungen durchgeführt wird, um zu ermitteln, wie ein neuer Beton oder eine neue Betonfamilie zusammengesetzt sein und hergestellt werden müssen, um alle festgelegten Anforderungen im frischen und erhärteten Zustand zu erfüllen.

Tafel IV.3-14 (Fortsetzung)

Expositionsklasse: Klassifizierung der chemischen und physikalischen Umgebungsbedingungen, denen der Beton ausgesetzt werden kann und die auf den Beton, die Bewehrung oder metallische Einbauteile einwirken können und die nicht als Lastannahmen in die Tragwerksplanung eingehen.

Festbeton: Beton, der sich in einem festen Zustand befindet und eine bestimmte Festigkeit entwickelt hat.

Fremdüberwachungsprüfung: Prüfung, die unter der Verantwortung einer Zertifizierungsstelle durchgeführt wird, um das Vertrauen in die Prüfergebnisse der Produktionslenkung sicher zu stellen.

Frischbeton: Beton, der fertig gemischt ist, sich noch in einem verarbeitbaren Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet werden kann.

Gesamtwassermenge: die Gesamtwassermenge ist die Summe aus dem Zugabewasser, dem im Zuschlag und auf dessen Oberfläche aufgenommenen Wasser, dem Wasser in Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, wenn diese in wässriger Form verwendet werden, und dem Wasser von zugefügtem Eis oder einer Dampfbeheizung.

Hochfester Beton: Beton mit einer Festigkeitsklasse ab C 60/75 im Fall von Normalbeton oder Schwerbeton und einer Festigkeitsklasse ab LC 55/60 im Fall von Leichtbeton.

Künstliche Luftporen: mikroskopisch kleine Luftporen, die während des Mischens – im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffs – absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise mit 10 µm bis 300 µm Durchmesser und kugelförmiger oder nahezu kugelförmiger Gestalt.

Leichtbeton: Beton mit einer Trockenrohdichte von nicht weniger als 800 kg/m³ und nicht mehr als 2000 kg/m³. Er wird ganz oder teilweise unter Verwendung von Leichtzuschlag hergestellt.

Leichtzuschlag: Zuschlag mineral. Herkunft mit einer Kornrohdichte $\leq$ 2000 kg/m³, bestimmt n. E DIN 4226 od. E DIN EN 1097-6 oder einer Schüttdichte $\leq$ 1200 kg/m³, best. n. E DIN EN 1097-3.

Leistungsbeschreibung: an den Hersteller gegebene Zusammenstellung der dokumentierten technischen Anforderungen bezüglich der Leistung oder der Zusammensetzung des Betons.

Tafel IV.3-14 (Fortsetzung)

Luftgehalt: der im Frischbeton gemessene Gesamtluftgehalt, bestehend aus Lufteinschlüssen und künstlichen Luftporen.

Luftporenbeton: Beton, der unter Verwendung von Luftporenbildnern hergestellt worden ist und deshalb ein besonderes Porengefüge aufweist.

Normalbeton: Beton mit einer Trockenrohdichte über 2000 kg/m³, höchstens aber 2600 kg/m³.

Normalzuschlag: Zuschlag mit einer Kornrohdichte > 2000 kg/m³ und < 3000 kg/m³, bestimmt nach E DIN EN 1097-6.

Nutzungsdauer: Die Zeitspanne, während der die Eigenschaften des Betons auf einem Niveau erhalten bleiben, das vereinbar ist mit der Erfüllung der Leistungsanforderungen an das Bauwerk, vorausgesetzt, dieses wird angemessen gewartet.

Ortbeton: Beton, der als Frischbeton in Bauteilen in ihrer endgültigen Lage eingebracht wird und dort erhärtet.

Schwerbeton: Beton mit einer Trockenrohdichte über 2600 kg/m³.

Schwerzuschlag: Zuschlag mit einer Kornrohdichte ≥ 3000 kg/m³, bestimmt nach E DIN EN 1097-6.

Standardbeton: Beton niedriger Festigkeit für eingeschränkte Anwendungsfälle, für den in dieser Norm ein auf der sicheren Seite liegender Mindestzementgehalt vorgegeben ist.

Transportbeton: Beton, der im frischen Zustand dem Verwender von einer Person oder einer Stelle, die nicht der Verwender ist, geliefert wird. Transportbeton im Sinne dieser Norm ist auch:
- Beton, der vom Verwender außerhalb der Baustelle hergestellt wird,
- Beton, der auf der Baustelle hergestellt wird, jedoch nicht vom Verwender.

Übereinstimmungsprüfung: Prüfung, die vom Hersteller durchgeführt wird, um die Produktübereinstimmung zu beurteilen.

Überwachungsstelle: anerkannte unparteiische Stelle, die die Übereinstimmungslenkung und die Produktionslenkung überprüft, um festzustellen, ob die Anforderungen dieser Norm erfüllt sind.

Wasserzementwert (w/z-Wert): Masseverhältnis des wirksamen Wassergehalts zum Zementgehalt im Frischbeton.

Tafel IV.3-14 (Fortsetzung)

Wirksamer Wassergehalt: die Differenz zwischen der Gesamtwassermenge im Frischbeton und der Wassermenge, die bis zum Erstarren des Betons vom Zuschlag aufgenommen wird.

Zement (hydraulisches Bindemittel): fein gemahlener, anorganischer Stoff, der mit Wasser vermischt einen Leim bildet, der durch Hydratation erhärtet und der nach dem Erhärten eine Festigkeit und Raumbeständigkeit, auch unter Wasser, behält.

Zertifizierungsstelle: anerkannte unparteiische Stelle, die die Übereinstimmung des Betons mit dieser Norm feststellt, die Ergebnisse der Fremdüberwachung abschließend bewertet und ein Zertifikat erteilt.

Zusatzmittel: Stoffe, die während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben werden, um Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern.

Zusatzstoffe: fein verteilte organische oder anorganische Stoffe, die im Beton verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um besondere Eigenschaften zu erreichen. In dieser Norm werden zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen behandelt:
- nahezu inerte Zusatzstoffe (Typ I) und
- puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe (Typ II).

Zuschlag (Gesteinskörnungen): Körniges mineralisches Material, das für die Verwendung in Beton geeignet ist. Zuschlag kann natürlich oder künstlich sein oder rezykliert aus einem Material, das vorher in Baukonstruktionen verwendet wurde.

Tafel IV.3-15: Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton – Teil 1

	kein Korrosions- oder Angriffs-risiko	durch Carbonatisierung verursachte Korrosion			
Expositionsklasse	X0[1]	XC1	XC2	XC3	XC4
höchstzulässiger w/z-Wert[5]	–	0,75		0,65	0,60
Mindestfestigkeitsklasse[4]	C8/10	C16/20		C20/25	C25/30
Mindestzementgehalt[5] in kg/m³	–	240		260	280
Mindestluftgehalt in Vol.-%	–	–		–	–
andere Anforderungen					
verwendbare Zementarten[3]	alle Zemente nach DIN 1164				

Fußnoten siehe Seite 744

Bewehrungskorrosion

durch Chloride verursachte Korrosion

andere Chloride als Meerwasser			Meerwasser		
XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
0,55	0,50	0,45	siehe XD1	siehe XD2	siehe XD3
C30/37[13)]	C35/45[13)]	C35/45[13)]			
300	320[2)]	320[2)]			
–	–	–	–	–	-

Zuschlag mit Regelanforderungen

alle Zemente nach DIN 1164

Tafel IV.3-16: Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton – Teil 2

	Frostangriff					
Expositionsklasse	XF1	XF2[7]		XF3		XF4[7] [14]
höchstzulässiger w/z-Wert[5]	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50
Mindestfestigkeitsklasse[4]	C25/30	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37
Mindestzementgehalt[5] in kg/m³	280	300	320	300	320	320
Mindest-Luftgehalt[6] in Vol.-%	–	4,0	–	4,0	–	4,0
andere Anforderungen	Widerstand der Zuschläge gegen Frost bzw. Frost und Taumittel (siehe DIN 4226-1)					
	F_4	MS_{25}		F_2		MS_{18}
verwendbare Zementarten[3]	alle Zemente nach DIN 1164	alle Zemente nach DIN 1164 außer: CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-V CEM II/B-SV		alle Zemente nach DIN 1164		CEM I CEM II/A-S CEM II/B-S CEM II/A-T CEM II/B-T CEM II/A-L CEM III/A[8] CEM III/B[10]

Fußnoten siehe Seite 744

Betonangriff						
chemischer Angriff			Verschleißangriff			
XA1	XA2	XA3*	XM1	XM2[12]		XM3[12]
0,60	0,50	0,45	0,55	0,55	0,45	0,45
C25/30	C35/45[13]	C35/45[13]	C30/37[13]	C30/37[13]	C35/45[13]	C35/45[13]
280	320	320	300[15]	300[15]	320[15]	320[15]
–	–	–	–	–	–	–
Zuschlag mit Regelanforderungen[11]						
*Oberflächenschutz oder Gutachten			–	Oberflächenbehandlung	–	–
alle Zemente nach DIN 1164	alle Zemente nach DIN 1164[9]		alle Zemente nach DIN 1164			

[1] Nur für Beton ohne Bewehrung
[2] Für massige Bauteile (> 80 cm) gilt: 300 kg/m³ Zement
[3] Neben den genormten Zementen sind auch für den entsprechenden Anwendungsfall bauaufsichtlich zugelassene Zemente verwendbar.
[4] Gilt nicht für Leichtbeton
[5] Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert (Wasser/(Zement + k × Zusatzstoff)-Wert) bzw. der Gesamtgehalt (Zement + Zusatzstoff) maßgebend. Die absoluten Mindestzementgehalte nach Tafel IV.3-18 sind zu beachten.
[6] Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn des Zuschlaggemisches von 8 mm = 5,5 Vol.-%, 16 mm = 4,5 Vol.-%, 32 mm = 4,0 Vol.-% und 63 mm = 3,5 Vol.-% betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 Vol.-% unterschreiten. Bei der Festlegung des Luftgehalts für den Zeitpunkt der Lieferung ist der mögliche Verlust während des Pumpens, des Verarbeitens und des Verdichtens zu berücksichtigen.
[7] Flugasche nach DIN EN 450 darf zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z-Wert angerechnet werden.
[8] Festigkeitsklasse ≥ 42,5 oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5 R mit einem Hüttensand-Massenanteil von ≤ 50%.
[9] Bei chemischem Angriff durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) muss oberhalb der Expositionsklasse XA1 (Tafel IV.3-3) Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) verwendet werden. Bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers von SO_4^{2-} ≤ 1500 mg/l darf anstelle von HS-Zement eine Mischung von Zement und Flugasche verwendet werden.
[10] CEM III/B darf nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:
a) Meerwasserbauteile: w/z ≤ 0,45; C 35/45 und z ≥ 340 kg/m³
b) Räumerlaufbahnen: w/z ≤ 0,35; C 40/50 und z ≥ 360 kg/m³; Beachtung von DIN 19 569
Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.
[11] Bei Verschleißbeanspruchung muss der Betonzuschlag bis 4 mm Größtkorn überwiegend aus Quarz oder aus Stoffen mindestens gleicher Härte bestehen, das gröbere Korn aus Gestein oder künstlichen Stoffen mit hohem Verschleißwiderstand. Bei extremer Beanspruchung sind Hartstoffe nach DIN 1100 zu verwenden. Die Körner aller Zuschlagarten sollen eine mäßig raue Oberfläche und gedrungene Gestalt haben. Das Zuschlaggemisch soll möglichst grobkörnig sein.
[12] Die Nachbehandlungsdauer ist gegenüber den Festlegungen der Ausführungsnorm E DIN 1045-3 zu verdoppeln.
[13] Wenn aufgrund der Expositionsklasse XF2 bis XF4 ein Luftporenbeton gefordert ist, kann eine Festigkeitsklasse niedriger verwendet werden.
[14] Erdfeuchter Beton (z. B. Pflastersteine) mit w/z < 0,40 darf ohne Luftporen hergestellt werden.
[15] Für alle Festigkeitsklassen ≤ C 55/67 Höchstwert z = 360 kg/m³.

Tafel IV.3-17: Mindestzementgehalt für Standardbeton mit einem Größtkorn von 32 mm und Zement der Festigkeitsklasse 32,5 nach DIN 1164-1

Festigkeitsklasse des Betons	Mindestzementgehalt in kg/m³ verdichteten Betons für Konsistenzbereich		
	steif	plastisch	weich
C 8/10	210	230	260
C 12/15	270	300	330
C 16/20	290	320	360

Der Zementgehalt nach Tafel IV.3-17 muß vergrößert werden um:

- 10% bei einem Größtkorn des Betonzuschlags von 16 mm
- 20% bei einem Größtkorn des Betonszuschlags von 8 mm

Der Zementgehalt nach Tafel IV.3-17 darf verringert werden um höchstens 10% bei Zement der Festigkeitsklasse 42,5 und höchstens 10% bei einem Größtkorn des Betonzuschlags von 63 mm.

Tafel IV.3-18: Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche und/oder Silicastaub

Expositionsklasse[1)] bzw. Anwendungsfall	Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m³
XC1, XC2, XC3	240
XC4, XS, XD, XA, XM, XF1, XF3	270
Beton für Unterwasserschüttung nach E DIN 1045-2 Abs. 5.4.1	270

[1)] Für XF2 und XF4 ist keine Reduzierung des Mindestzementgehalts nach Tafel IV.3-16 möglich

Tafel IV.3-19: Internationale Normung für Betonzusatzmittel DIN EN 934: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel

Teil	Titel	Status und Ausgabe-Jahr der deutschen Fassung
1	Definitionen und allgemeine Anforderungen für alle Arten von Zusatzmitteln	wird zuletzt bearbeitet
2	Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen	EN 934-2 1997
2/A1	wie vor	EN 934-2/pr A1 1998
3	Zusatzmittel für Mauermörtel; Definitionen, Anforderungen und Konformität	prEN 934-3 1998
4	Zusatzmittel für Einpressmörtel für Spannglieder; Definitionen, Anforderungen und Konformität	EN 934-4 2000
5	Zusatzmittel für Spritzbeton; Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien	prEN 934-5 1998
6	Probenahme, Konformitätskontrolle, Bewertung der Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung	EN 934-6 2000

Tafel IV.3-20: Rohdichten von Zement und weiteren Fein- bzw. Feinststoffen des Betonbaus

Feststoff		Rohdichte in kg/dm³
Zemente [DIN 1164]	Portlandzement (CEM I)	3,05–3,15
	Portlandkompositzement (CEM II)	3,00–3,10
	Hochofenzement (CEM III)	3,00–3,05
Trass [DIN 51043]		2,40–2,60
Flugasche [DIN EN 450]		2,20–2,50
Silicastaub [E DIN EN 13263]		2,20–2,40
Gesteinsmehle		2,60–3,10

Das Verhältnis von Masse zu Volumen eines Stoffs wird allgemein als **Dichte** bezeichnet.
Die **Rohdichte** eines Stoffs ergibt sich aus dem Quotienten der Masse des Stoffs und seines Volumens einschließlich der im Stoff enthaltenen Porenräume.
Die **Reindichte** ergibt sich aus dem Quotienten der Masse des Stoffs und seines porenfreien Volumens.
Die **Schüttdichte** ist das Verhältnis der Masse des Stoffs und des geschütteten Volumens. Das geschüttete Volumen von körnigen Stoffen kann je nach Feinheit und Packung der Partikel in sehr weiten Grenzen schwanken.

Die Schüttdichte von Silicastaub liegt im Bereich von 0,35 bis 0,40 kg/dm³, die von Zement und anderen zementfeinen Feinstoffen zwischen 0,8 bis 2,0 kg/dm³. Unmittelbar nach dem Mahlen oder nach einer pneumatischen Förderung ist der Luftgehalt sehr hoch und damit die Schüttdichte klein. Lose eingefüllter Zement hat eine Schüttdichte zwischen 0,9 und 1,2 kg/dm³. Wird der Zement eingerüttelt, so steigt seine Schüttdichte auf 1,6 bis 1,9 kg/dm³ an. Wegen der Veränderlichkeit der Schüttdichte, die z.B. beim Abziehen aus dem Silo je nach dem Grad der Entlüftung zwischen 0,9 und 1,5 kg/dm³ schwanken kann, ist eine volumetrische Zugabe von Zement und von Betonzusatzstoffen bei der Betonherstellung unzulässig. Für tragende Bauteile dürfen diese nur nach Gewicht abgemessen werden.

4 Stichwortverzeichnis

Abdichtung 526
Abnutzungsvorrat 555
Abplatzungen 427
Abschlämmbare Bestandteile 254
Abtragsrate 383
Abwasser 388
Adiabatische Bedingungen 315
Alit 38
Alkaliauslaugungen 460
Alkaliempfindliche Zuschlagbestandteile 410
Alkaliempfindlichkeitsklassen 417
Alkalien 167
Alkaligehalt 163
Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) 409
Alkaliresistentes Glas 258
Alkalisulfat 41
Alkalität 367
Alkalitreiben 163
Alkali-Zuschlag-Reaktion 281, 409
Aluminatferrit-Monosulfat 116
Aluminatferrit-Trisulfat 116
Aluminiumhydroxid 168
Ammoniak 91, 603
Ammoniumionen 389
Anfangserhärtung 153
Anfangsfestigkeit 152
Angriffsgrad 385
Angriffswiderstand 162
Anhydrit 121
Annahmeprüfungen 585
Anrechnung (Zusatzstoff) 216
Ansatzbildung 84
Ansteifen 145, 299
Aragonit 168, 366
Arbeitssicherheit 96
Asbestfasern 258
Atemschutz 105
Außenputze 546
Ausbreitmaß 290
Ausbreitversuch 290
Ausfallzeit 100
Ausgussbeton 477
Auslaugung 460
Ausschalfristen 450
Ausschleusung 89
Austauschfähige Salze 395
Austrocknen 153

Baulicher Brandschutz 423
Bauproduktengesetz 179
Baustellenbeton 437
Baustellenmörtel 542
Befördern 438
Belit 38
Beschleuniger 461
Beton 179
Beton („grüner B.") 299
Beton („junger B.") 278, 299
Betonanwendung 185
Betonbauweise, 190
Betonbauwerk 187
Betonbrechsand 572
Betondecken 502
Betondeckung 432
Betonerzeugnisse 485
Betonfamilie 581
Betongüteklassen 190
Betonkorrosion 394
Betonoberfläche 483
Betonsplitt 572
Betonschutzwände 518
Betonwaren 186
Betonwerkstein 483
Betonzusammensetzung 510
Betonzusatzmittel 224, 430, 597, 602, 604
Betonzusatzstoffe 154, 209, 597, 602, 603
Betriebsfestigkeit 306
Bewehrung 187
Bewehrungsstahl 186, 432

Biegezugfestigkeit 310
Bindemittel 185, 541
Blaine-Wert 141
Bluten 150
Boden 589, 590
Branchenregelung 108
Brennbarkeit 429
Brennertechnik 89
Brenngutreaktionen 64
Brennstoffe 35
Brennstoffenergieverbrauch 35, 94
Brennverfahren 14
Bypass 84

Calcinator 90
Calcit 162
Calciumaluminatferrit 40
Calciumaluminatsulfathydrat 115
Calciumcarbonat 162
Calciumhydroxid 114, 129, 164, 167
Calciumoxid 154
Calciumsilicathydrat 112, 129, 168
Calciumsulfat 171
Carbonatisierung 166, 167, 280, 281, 368
Carbonatisierungsschwinden 168, 345
Carbonatisierungstiefe 168
Chargenmischer 75
Chemikaliengesetz 102
Chemische Bindungsvorgänge 176
Chemischer Angriff 162
Chemisches Schwinden 344
Chloridbindevermögen 373
Chloriddiffusion 374
Chloriddiffusionswiderstand 373
Chlorid 84, 372
Chlorideinbindung 280
Chlorideindringung 281
Chloridionen 167
Chloridpenetration 373
Chlorwasserstoff 84
Chromat 107
Chromatreduzierung 109

CO_2-Emissionen 93
Colcrete 477
Contractor-Verfahren 471
C-Wert 329

Dampfmischen 326, 437
Dauerhaftigkeit 181, 280, 491, 572
Dauerhaftigkeitsaspekte 491
Dauerhaftigkeitsbemessung 382
Dauerspannung 341
Dauerstandfestigkeit 306, 335
Dehnung 333
Depassivierung 367
Deutscher Beton-Verein 188
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 188
Dicalciumsilicat 39, 64
Dichtheit 170, 519
Diffusion 155
Dioxine 86
Distickstoffoxid 93
Doppelbrechung 168
Dosierung 435
Drehrohr 59
Dreistoffdiagramm 37
Druckausgleichsverfahren 297
Druckfestigkeit (Zement-, Norm-) 152
Druckfestigkeit (Beton-) 306
Druckfestigkeitsklassen 183
Dünnbettmörtel 544, 545
Dünnschliff 168
Durchlaufmischer 75
Durchlässigkeit 271, 521
Dynamischer E-Modul 341

Eigenspannungen 352
Einbringen 445
Einpressarbeiten 554
Einpresshilfe EH 553
Einpressmörtel 552
Eisenbeton 187
Eisenportlandzement 9
Elastische Formänderung 334
Elastizitätsmodul 272, 335
Elektrischer Energiebedarf 96

Elektrofilter 87
Elutionsverfahren 594
Emissionen 78
E-Modul 251, 339, 340
Endfestigkeit 153
Endkriechdehnung 342
Energieausnutzung 70
Energieverbrauch 48
Entschalen 450
Entsorgung 106
Entsäuerung 57
Entwurfseigenschaften 265
Erdfeuchter Beton 488
Erhärten 116, 144, 299
Erschütterungen 87, 93
Erstarren 116, 139, 299
Erstarrungsbeginn 145
Erstarrungsende 145
Erstarrungsverhalten 466
Erstprüfung 181, 284, 583, 598
Estrich 549
Estrich auf Trennschicht 552
Ettringit 115, 168
Ettringittreiben 163
Expansionsmörtel 349
Expertensystem 76
Expositionsklassen 183, 364, 385, 394

Fällungsreaktionen 176
Falsches Erstarren 120, 147
Faserspritzbeton 461
Feinkornanteil 142
Festbeton 179, 270, 299
Festbetoneigenschaften 265
Festbetonrecycling 571
Feste Fahrbahn 517
Festigkeit 139, 170, 425
Festigkeitsentwicklung 152, 312, 332
Festigkeits-Hydratationsgrad-Beziehung 323
Festigkeitsklassen 152, 154, 250, 340
Feuchtigkeitszustand 169
Feuerwiderstand 423
Fließfähigkeit 553
Flüchtige Substanzen 602
Flüssigkeitsdichter Beton 532
Flugasche 43, 140, 212
Förderart 442
Fördergeräte 442
Fördern 441
Formänderungen 333
Freies CaO (Freikalk) 40, 154
Freies MgO (Periklas) 40
Freisetzbarer Anteil 238
Friedelsches Salz 116
Frischbeton 179, 267, 287, 299
Frischbetoneigenschaften 264
Frischbetonrecycling 569
Frischbetonrohdichte 296
Frischbetontemperatur 148, 297, 490
Frost- und Frost-Tausalzangriff 281
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand 358
Frühfestigkeit 307, 488
Frühfestigkeitsentwicklung 315
Frühschwinden 303, 344
Fünf-Stoff-System 179, 263
Fugen 354, 526
Fugenmörtel 546
Funktionelle Einheit 606, 609
Furane 86

Gebrannter Schiefer 140
Gebrauchszustand 339
Gefährdung 98
Gefahrensätze 103
Gefahrstoffverordnung 102
Gefrierbeständigkeit 332
Gefügefestigkeit 166
Gelporen 133
Gemeinsames Feinmahlen 73
Gesamtalkaligehalt 412
Gesamtchloridgehalt 372
Gesamtporosität 157
Gesamtversandmenge 205
Gesamtwassergehalt 223
Gesteinsmehle 219

Getrenntes Mahlsystem 68
Getrenntes Feinmahlen 73
Getrenntes Vormahlen 73
Gewebefilter 87
Gips 121, 168
Gipstreiben 163
Glasfasern 259, 260
Gleitbauverfahren 463
Gleitschalung 463
Grenzwerte 81
Griffigkeit 510
Grundwasser 589, 590
Gründruckfestigkeit 448
Grünstandfestigkeit 267, 488
Gutbett-Walzenmühle 70

Halbhydrat 121
Halbtrockenverfahren 52, 55
Handschutz 105
Haufwerksporiger Leichtbeton 489
Hauptbestandteile 21, 42, 143
Hautreaktionen 104
Herstellung des Zementklinkers 48
Herstellung des Betons 435
Hochfester Beton 427
Hochfester Stahl 258
Hochleistungsbeton 277
Hochofenschlacke 41
Hochofenzement 25, 42
Hoher Sulfatwiderstand 30
Homogenisierung 74
HS-Eigenschaft 170
HS-Zement 30, 395
Hüttensand 8, 41, 140
Hydratationsgeschwindigkeit 123
Hydratationsgrad 271
Hydratationsprodukte 128
Hydratationswärme 125, 315, 317, 467
Hydratationswärmefreisetzung 317
Hydratphasen 111, 176
Hydraulische Erhärtung 186
Hydraulischer Kalk 185
Hydrocrete 477
Hydrolyse 281, 397
Hydrophobierter Zement 32
Hydroventilverfahren 473

Inhaltsstoffe 592
Injektionsverfahren 479
Innenputze 546
Innenrüttler 190
Inspektion 555, 556
Instandhaltung 555
Instandsetzung 555, 556
Instandsetzungsmörtel 563
Instandsetzungsprinzipien 562
Instationäre Erwärmung 424
Isotherme Bedingungen 315
Istzustand 555

Kalkhydrat 91
Kalklösende Kohlensäure 385
Kalkstandard 66
Kalkstein 33, 47
Kalksteinbeton 425
Kalktreiben 40, 163
Kapillares Saugen 155
Kapillarporen 134, 271, 280
Kapillarporengehalt 157
Kapillarporosität 168
Kapillarschwinden 303, 344
Kennzeichnung 103
Kieselgel 168
Klasseneinteilungen 183
Klimarelevante Gase 93
Klimaschutz 94
Klinkerkühler 61
Klinkerphasen 38
Körnungsnetz 142
Kohlendioxid 148, 162
Kohlenmonoxid 84
Kohlensäure 167
Kohlenstofffasern 258
Konsistenzbereiche 267
Konsistenz 127, 267, 287
Konsistenzklassen 183, 267
Kontrollprüfungen 585
Koordinator 100
Kornform 250

Korngrößenverteilung 72, 73, 141, 149
Korngruppe 248
Kornrohdichte 250
Kornzusammensetzung 255
Korrosion 367, 375
Korrosionsschutz der Bewehrung 167, 226, 562
Kreide 33
Kreislaufverhalten 84
Kriechen 334
Kriechverformungen 279
Kriechzahl 341
Kristallisationsdruck 162
Kristallwachstumsdruck 164
Kristallwasser 133
Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt 379
Kritische Sättigung 359
KTW-Empfehlungen 597
Kübelverfahren 472
Kühlen des Klinkers 64
Kugelmühlen 69
Kunststoffdispersionen 221
Kunststofffasern 258, 259, 261
Kurzzeitfestigkeit 306
k-Wert 214

Lärmemission 512
Lärmimmission 86
Lärmquelle 92
Lärmschutzmaßnahmen 86, 92
Lageparameter 142
Lagerung 148
Laminare Strömung 155
Laser-Granulometer 142
Le Chatelier-Ring 154
Leichtbeton 427
Leichtmörtel 544, 545
Leichtzuschlag 243
Leistungsfähigkeit 74
Leistungsklassen 265
Leistungsmerkmale 195
Lepol-Ofen 55
Lieferschein 440
Lieferung des Betons 439
Löffelbinder 147
Lösender Angriff (Säureangriff) 162, 280
Löslichkeit 167, 174
Luftgehalt 296
Luftporen 361

Magnesia 154
Magnesiatreiben 40, 163, 280
Magnesiumhydroxid 172
Magnesiumionen 389
Magnesiumoxid 154
Magnesiumsulfat 171
Mahlbarkeit 67
Mahlfeinheit 73, 141
Mahlhilfen 602
Mahlkreislauf 74
Mahlsystem 149
Mahlverfahren 68
Makrokorrosion 376
Mangel 555
Massenbeton 466
Massenverteilungssumme 142
Mauermörtel 544
Maurerkrätze 107
Meerwasser 367, 385, 394
Methan 93
MgO-Gehalt 40
Mikrorisse 335
Minderungspotential 95
Mischen 73, 436
Mischer 436
Mischkristallreihe 166
Mischung 68
Monocarbonat 116, 168
Monochlorid 116
Monosulfat 164, 168
Moorwässer 382
Mörtel 179, 541, 562
Mörtelzuschlag 541

Nachbehandlung 153, 370, 450, 466
Nachbehandlungsempfindlichkeit 303
Nachbehandlungsmaßnahmen 455

Nachbehandlungsmittel 455
Nacherhärtung 307, 330
Nachmahlung 74
Nachverdichten 446
Nassspritzverfahren 457
Nasswäsche 92
Natriumsulfat 171
NA-Zement 42, 163
Nebenbestandteile 21, 140
NH_3-Schlupf 91
Nichtflüchtige Spurenelemente 80
Niederschlagswasser 383
Niedrige Hydratationswärme 30
Normalbeton 284
Normalmörtel 544
Normalzuschlag 241
Normdruckfestigkeit des Zements 151, 272
Normen 10
Normmörtel 151
Normsteife 145
NO_x-arme Feuerungstechnik 89
NO_x-Minderung 89
Nutzung 612

Oberfläche nach Blaine 141
Oberflächenrisse 278
Oberflächenschutzsysteme 562
Ofenführungssysteme 76
Ofenkapazitäten 53
Ökobilanz 606
Ölschiefer 25, 46
Opus Caementitium 4, 185
Organische Emissionen 84

Passivität 367
Passivschicht 167, 367
Periklas 40
Phasenneubildung 162, 491
Phasenzusammensetzung 38, 66
Phenolphthalein-Indikatortest 168
pH-Wert 167
Pigmente 219, 483
Planetenkühler 61
Plastische Formänderung 334
Plastisches Schwinden 344
Polystyrolbeton 430
Porenbeton 429, 490
Porenflüssigkeit 357
Porengrößenverteilung 157
Porenlösung 136, 165, 176
Porenvolumen 157, 271
Portland-Cement 6
Portlandflugaschezement 24, 44
Portlandhüttenzement 42
Portlandkalksteinzement 24, 47
Portlandkompositzemente 24, 73
Portlandölschieferzement 25, 46
Portlandzement 21
Portlandzementklinker 33, 38, 154
Prepact 477
Primäre, prozessintegrierte Maßnahmen 89
Primärer Ettringit 164
Primärluft 60
Produktionslenkung 584
Produktionsstätten 6
Prüfungen 362, 597, 598, 600
Pumpbeton 442
Pumpverfahren 476
Putzmörtel 546
Puzzolane 43, 140, 218
Puzzolanisch reagierende Stoffe 124
Puzzolanische Zusatzstoffe 422

Qualität 76
Qualitätslenkung 584
Qualitätskriterien 186
Qualitätssicherung 76, 575
Qualitätssicherungssysteme 77
Quecksilber 81
Quellen 280, 344, 348, 553
Quellzement 32, 348
Querdehnung 338
Querdehnungszahl 337

Radioaktivität 605
Radon 605, 606
Raumbeständigkeit 139, 154
Recyclingfähigkeit 515
Reduktionsmittel 91

Reife 327
Reifefunktionen 328
Reifegrad 332
Relaxation 342
Restbeton 569
Restbetonzuschlag 569
Restwasser 223, 569
Rezyklierter Zuschlag 247, 572
Rissbildung 162
Rissfüllstoffe 562
Rohdichte 489
Rohdichteklassen 183
Rohmehl 140
Rohrkühler 61
Rohrmühlen 51
Rohstoffe 33
Rostkühler 61
Rostvorwärmer („Lepol"-Ofen) 55

Sachbilanz 606
Sättigungsgrenze 294
Säureangriff 280
Säuren 383
Säurewiderstand 281
Sanierputze 548
Satellitenkühler 61
Schachtöfen 60
Schaden 555
Schädigungstiefe 383
Schädliche Bestandteile 254
Schalldämmende Gebäude 92
Schalldämpfer 93
Schalung 483
Schleuderbeton 462
Schnelles Erstarren 120
Schnellprüfverfahren 171
Schnellzement 32
Schutzausrüstung 104
Schutzschicht 390, 391
Schwefel 82
Schwefeldioxid 162
Schwefelkreislauf 92
Schwefelwasserstoff 162
Schwerflüchtige Elemente 80
Schwermetalle 79, 88
Schwerzuschlag 245
Schwimmender Estrich 551
Schwinden 130, 280, 344, 424
Sekundärbrennstoffe 35
Sekundäre Ettringitbildung 165, 491
Sekundärgips 120, 147
Sekundärluft 60, 61
Sekundärrohstoff 35
Selbstabdichtung 524
Selbstverdichtender Beton 301, 448
Selbstverpflichtung 48
"Selfcompacting Concrete" (SCC) 301
Setzeitversuch 290
Setzversuch 290
Sicherheitsdatenblatt 102
Sicherheitsratschläge 103
Sichtbeton 303, 483
Siebanalyse 141
Sieblinien 255
Silicastaub 47, 216
Silicatmodul 66
Sinterzone 59
SNCR-Verfahren 91
SO_2-Emissionen 83, 91
SO_2-Minderung 91
Sollzustand 555
Sondereigenschaften (Zement) 30
Sorptionseffekte 176
Spachtelmassen 562
Spaltrisse 278
Spaltzugfestigkeit 310
Spannbeton 190
Spannbetonbauweise 552
Spannstahl 552
Spannungsdehnungslinie 335
Sprengverfahren 93
Spritzbeton 457
Spritzbetonhilfe 460
Spritzbetonzement 32, 461
Spritzverfahren 457
Spurenelemente 79
Spurenelementgehalte 172
Stahlbeton 187
Stahlfasern 259, 260, 461
Stahlgüteklassen 190

Stampfbetonherstellung 186
Staubemissionen 78
Stauchung 333
Steigungsmaß 142
Stickstoffoxide 81
Stoffe organischen Ursprungs 254
Sulfat (Rohstoff) 83, 383
Sulfatangriff 163, 383, 394
Sulfatgehalt 122
Sulfationen 164
Sulfatisierungsgrad 41
Sulfatträger 120
Sulfattreiben 163, 280
Sulfatwiderstand 42, 170, 396
Sulfide 83
SVB 301

Technischen Regeln 596
Teiladiabatische Bedingungen 315
Temperaturbeanspruchung 423
Temperaturerhöhung 315, 317
Temperaturverformungen 280
Tertiärluft 61
Tertiärluftleitung 58, 90
Tetracalciumaluminathydrat 115
Thallium 80
Thaumasit 163
Thermische Dehnungen 424
Thermosgefäß 322
Tiefbohrzement 32
Ton 33
Tonerdemodul 66
Tonerdezement 32, 124
Toxikologisch unbedenkliche Substanzen 237
Tragschichten 497
Transport 106
Transportbeton 437
Transportvorgänge 280
Trass 43
Treibender Angriff 162, 280
Treibende Reaktion 40, 383
Treiberscheinung 162, 163, 280
Tricalciumaluminat 40
Tricalciumsilicat 38, 64
Trinkwasser 223, 596, 597
Trockenadditiv-Verfahren 91
Trockenbeton 438
Trockene Aufbereitung 50
Trockenspritzverfahren 457
Trockenverfahren 52
Trocknungsschwinden 345
Tunnelbau 460

Übereinstimmungsnachweis 577
Überwachungsprüfungen 579
Überwachungsrichtlinien 226
Umweltverträglichkeit 587
Unfallhäufigkeit 100
Unfallstatistik 100
Unterwasserbeton 468
Unterwasser-Injektionsbeton 477
Unterwasserschüttung 470

Vakuumbeton 481
Vaterit 168, 366
Verarbeitbarkeit 150, 183, 267
Verarbeitbarkeitszeit 181, 267
Verarbeitungszeit 146
Verbund 552
Verbundbaustoff Beton 179
Verbundestrich 551
Verbundmahlanlagen 68
Verdichten 190
Verdichtung 446
Verdichtungsart 446
Verdichtungsversuch 290
Verformungen 425
Verformungsverhalten 273
Vergleichmäßigung 74
Verschleiß (Zuschlag) 252
Verschleißwiderstand 401
Verteilung (Siebanalyse) 143
Verteilungsausgleichsgrade 142
Vertikal-Wälzmühle 72
Verunreinigungen 148
Verweilzeit 64
Viskosität 145, 292
Volumenvergrößerung 171
Vorcalciniertechnik 56
Vorlagerung 165
Vormauermörtel 546

Wälzmühle 51
Wärmeabflussbedingungen 315
Wärmebehandlung 164, 325, 326, 490
Wärmedehnung 252
Wärmedehnzahl 349
Wärmeleitfähigkeit 489
Walz-Kurve 272
Warmbeton 490
Wartung 555, 556
Wasser 223
Wasserabsetzen 553
Wasseradsorption 165
Wasseranspruch 145, 149, 258, 553
Wasseraufnahme 250, 572
Wasserdurchlässigkeit 157
Wassergefährdungsklasse 106
Wasserrückhaltevermögen 466
Wasserundurchlässigkeit 524
Wasserzementwert 127, 146, 271
„Weiße Wanne" 519
Weißzement 32
Werk-Frischmörtel 543
Werkmäßige Herstellung 485
Werkseigene Produktionskontrolle 578
Werk-Trockenmörtel 542
Werk-Vormörtel 543
Wirksames Betonalter 327, 329
Wirksamer Alkaligehalt 411
Wirkungsabschätzung 606

Zement 3, 195, 506
Zementanwendung 186
Zementarten 19, 140
Zemente mit besonderen Eigenschaften 12
Zementforschung 7
Zementgel 129, 271
Zementklinker 38, 66
Zementkomponenten 68
Zementleim 116, 144, 562
Zementmörtel 552
Zementnorm 19, 188
Zementrohstoffe 48
Zementstein 129, 144
Zementsuspension 562
Zementwerke 33
Zentrischer Zugversuch 310
Zerkleinerung 13
Zucker 148
Zugabemengen 224
Zugabewasser 223, 541
Zugbruchdehnung 278
Zugfestigkeit (Beton-) 162, 306
Zulassungsrichtlinien 226
Zusammensetzung des Zements 154
Zusatzmittel 507, 541
Zusatzstoffe 151, 541
Zuschlag 240, 507
Zwangbeanspruchung 467
Zwang 350
Zweistufige Mahlsysteme 68
Zyklonvorwärmer 54

5 Adressen

Verzeichnis der im VDZ zusammengeschlossenen Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland mit ihren zementhaltigen Produkten

Stand: Januar 2000

ALSEN AG
Hauptverwaltung
Postfach 11 23 07, 20423 Hamburg
Ost-West-Str. 69, 20457 Hamburg
Tel.: (0 40) 3 60 02-0
Fax: (0 40) 36 24 50

Werke:

HANSA Bremen
Postfach 21 02 20, 28222 Bremen
Auf den Delben 35, 28237 Bremen
Tel.: (04 21) 6 44 00 11/12
Fax: (04 21) 64 79 38

CEM III/A	32,5, 32,5-we, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

Hardegsen
Postfach 20, 37177 Hardegsen
Zementfabrik 4, 37181 Hardegsen
Tel.: (0 55 05) 5 04-0
Fax: (0 55 05) 5 04-99

CEM I	42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Höver
Postfach 10 02 65, 31313 Sehnde
Hannoversche Straße 28, 31319 Sehnde
Tel.: (0 51 32) 9 27-0
Fax: (0 51 32) 9 27-4 30

CEM I	32,5 R, 32,5 R-st, 42,5 R, 42,5 R-em, 52,5 R
CEM II/A-S	42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 32,5 NW/NA
CEM III/B	32,5 NW/HS/NA

Lägerdorf
Postfach 11 60, 25564 Lägerdorf
Sandweg 10, 25566 Lägerdorf
Tel.: (0 48 28) 6 00
Fax: (0 48 28) 16 90

CEM I	32,5 R, 32,5 R-pe, 32,5 R-NA, 32,5 R-st, 42,5 R, 42,5 R-em, 42,5-NA, 52,5 R, 52,5 R-NA, 52,5 R-HS/NA

Lägerdorf (Fortsetzung)

CEM II/B-P	32,5 R
CEM II/A-S	42,5 R, 42,5 R-NA
CEM II/B-S	32,5 R, 32,5 R-NA
CEM III/A	32,5, 32,5-NA
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

Rostock
Postfach 48 12 40, 18134 Rostock
Ost-West-Straße 14, 18147 Rostock
Tel.: (03 81) 67 00-3 00
Fax: (03 81) 67 00-3 01

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R, 32,5 R-NA
CEM II/A	42,5 R-NA
CEM III/A	32,5, 32,5-NA
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

AZ ZEMENTWERKE AKTIENGESELLSCHAFT
Anneliese

ANNELIESE Zementwerke Aktiengesellschaft
Hauptverwaltung
Postfach 11 52, 59303 Ennigerloh
Finkenweg 26, 59320 Ennigerloh
Tel.: (0 25 24) 29-0
Fax: (0 25 24) 29-1 70
E-mail: marketing@azag.de
Internet: www.azag.de

Werke:

Ennigerloh Nord
Postfach 11 52, 59303 Ennigerloh
Zur Anneliese 1, 59320 Ennigerloh
Tel.: (0 25 24) 29-0
Fax: (0 25 24) 29-1 70

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/A-S	42,5 R
CEM II/B-P	32,5 R
CEM III/A	32,5, 32,5-NW/NA, 42,5-NA,
CEM III/B	42,5-NW/HS/NA

Ennigerloh Süd
Postfach 11 52, 59303 Ennigerloh
Neubeckumer Straße 92,
59230 Ennigerloh
Tel.: (0 25 24) 29-0
Fax: (0 25 24) 29-1 70

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 42,5 R-HS/NA, 52,5 R
CEM II/B-S 32,5 R
CEM II/B-P 32,5 R
CEM III/A 32,5-NW/NA
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA
Putz- und Mauerbinder
Sonderprodukte

Werksgruppe Geseke
Postfach 13 65, 59584 Geseke
Bürener Straße 46, 59590 Geseke
Tel.: (0 29 42) 5 03-0
Fax: (0 29 42) 5 03-41

CEM I 32,5 R, 42,5-tb, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/A-L 52,5

Paderborn
Postfach 11 29, 33041 Paderborn
Am Atlaswerk 16, 33106 Paderborn
Tel.: (0 52 51) 71 06-0
Fax: (0 52 51) 71 06-66

CEM I 32,5 R, 42,5-tb, 42,5, 42,5 R, 42,5 R-HS/NA
CEM II/A-L 32,5 R
CEM II/B-S 32,5 R-NA
CEM II/B-P 32,5 R
CEM III/A 32,5, 32,5-NW/NH
Putz- und Mauerbinder

Zementwerk Berlin GmbH & Co. KG
Postfach 60 11 40, 10252 Berlin
Köpenicker Chaussee 9/10
10317 Berlin
Tel.: (0 30) 5 57 52-0
Fax: (0 30) 5 57 52-10
Internet: www.zementwerk.de

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM III/A 32,5
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA
Trockenmörtel
Spezialbindemittel

Portland-Zementwerk BOSENBERG
Bücker-Flürenbrock GmbH & Co. KG
Postfach 47/48, 59218 Ahlen
Am Bosenberg 37-39, 59227 Ahlen
Tel.: (0 23 82) 80 79-0
Fax: (0 23 82) 80 79-89

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/B-T	52,5
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 32,5-NA/NW
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA
Putz- und Mauerbinder MC 12,5	

BREISGAUER CEMENT

Breisgauer Cement GmbH
Hauptverwaltung
Alte Weinstraße 59
79588 Efringen-Kirchen
Tel.: (0 76 28) 8 04-0
Fax: (0 76 28) 8 04-1 50

Werke:

Geisingen
Tuttlinger Straße 7, 78187 Geisingen
Tel.: (0 77 04) 8 04-0
Fax: (0 77 04) 8 04-2 50

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/B-T	32,5 R
CEM II/A-L	32,5 R

Kleinkems
Alte Weinstraße 59
79588 Efringen-Kirchen
Tel.: (0 76 28) 8 04-0
Fax: (0 76 28) 8 04-1 50

CEM I	52,5 R
CEM II/A-L	52,5
CEM III/A	32,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

Buderus
GUSS

Buderus Guss GmbH
Postfach 12 40, 35573 Wetzlar
Sophienstraße 52-54, 35576 Wetzlar
Tel.: (0 64 41) 49-0
Fax: (0 64 41) 49-13 03

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/A-S	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

Putz- und Mauerbinder MC 5

BUECHL ZEMENT
Betriebs- und Vertriebs-GmbH & Co. KG
Donaustauferstraße 199
93055 Regensburg
Tel.: (09 41) 40 25-0
Fax: (09 41) 40 25-9 01

CEM I	32,5 R, 42,5, 52,5, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R

Deuna Zement

Deuna Zement GmbH
Industriestraße 7, 37355 Deuna
Tel.: (03 60 76) 80
Fax: (03 60 76) 8 22 55
E-mail: info@deuna-zement.de
Internet: www.deuna-zement.de

CEM I	32,5 R, 32,5 R-sd, 32,5 R-pe, 32,5 R-HS, 42,5 R, 42,5 R-HS, 42,5 R-SE
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/A-S	42,5 R, 52,5 R
CEM III/A	32,5-NW/NA
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

Spezialbindemittel

Dyckerhoff
Zement

Dyckerhoff Zement GmbH
Hauptverwaltung
Postfach 22 47, 65012 Wiesbaden
Biebricher Straße 69, 65203 Wiesbaden
Tel.: (06 11) 6 76-0
Fax: (06 11) 6 76-10 40

Werke:

Geseke
Postfach 11 61, 59582 Geseke
Schneidweg 28–30, 59590 Geseke
Tel.: (0 29 42) 5 96-0
Fax: (0 29 42) 5 96-39

CEM I 52,5 R
CEM II/A-L 32,5 R, 42,5 R

Göllheim
Postfach 6, 67306 Göllheim
Dyckerhoffstraße, 67307 Göllheim
Tel.: (0 63 51) 71-0
Fax: (0 63 51) 4 32 77

CEM I 32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-S 32,5 R
Tragschichtbinder HT 35
Putz- und Mauerbinder MC 5, MC 12,5

Lengerich
Postfach 12 40, 49512 Lengerich
Lienener Straße 89, 49525 Lengerich
Tel.: (0 54 81) 31-0
Fax: (0 54 81) 31-3 98

CEM I 32,5 R, 32,5 R-sd, 42,5 R, 42,5 R-HS/NA, 52,5 R
CEM II/A-S 32,5 R
CEM III/A 32,5
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA

Mainz-Amöneburg
Postfach 22 47, 65012 Wiesbaden
Biebricher Straße 74, 65203 Wiesbaden
Tel.: (06 11) 6 76-24 12
Fax: (06 11) 6 76-26 85

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 52,5 R, 42,5 R-dw, 52,5-sw
CEM II/B-S 32,5 R
CEM III/A 32,5
CEM III/B 32,5-NW/HS
Tragschichtbinder HT 35
Putz- und Mauerbinder MC 5

Neubeckum
Postfach 21 64, 59254 Beckum
Dyckerhoffstraße 85, 59269 Beckum
Tel.: (0 25 25) 74-0
Fax: (0 25 25) 74-21

CEM I	32,5 R, 32,5 R-pe, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/B-S	32,5 R, 42,5 R
CEM II/A	32,5
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Neuwied
Postfach 14 43, 56504 Neuwied
Rheinstraße 159, 56564 Neuwied
Tel.: (0 26 31) 8 08-0
Fax: (0 26 31) 8 08-3 00

CEM I	42,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/A-S	42,5 R
CEM II/B-P	42,5
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

Neuss
Königsberger Straße 35, 41460 Neuss
Tel.: (0 21 31) 7 17 69-0
Fax: (0 21 31) 7 17 69-12

CEM III/A	32,5, 42,5

HEIDELBERGER ZEMENT

Heidelberger Zement Aktiengesellschaft
Hauptverwaltung
Postfach 10 44 20, 69034 Heidelberg
Berliner Straße 6, 69034 Heidelberg
Tel.: (0 62 21) 4 81-0
Fax: (0 62 21) 4 81-5 54

Heidelberger Zement AG (Fortsetzung)

Werke:

Burglengenfeld
Postfach 11 60, 93129 Burglengenfeld
Zementwerkstraße 3
93133 Burglengenfeld
Tel.: (0 94 71) 707-0
Fax: (0 94 71) 707-2 99

CEM I	32,5 R, 32,5 R (Estrichzement), 42,5 R, 52,5, 52,5 R, 52,5 R-en, 52,5-NA
CEM II/A-L	32,5 R, 42,5 R, 32,5 R-NA
CEM III/A	32,5-NW
CEM III/B	32,5-NW/HS

Tragschichtbinder

Kiefersfelden
Postfach 40, 83084 Kiefersfelden
Am Neugrund 39, 83088 Kiefersfelden
Tel.: (0 80 33) 60-0
Fax: (0 80 33) 60-2 80

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/A-S	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R

Leimen
Postfach 11 60, 69169 Leimen
Rohrbacher Straße 95, 69181 Leimen
Tel.: (0 62 24) 703-0
Fax: (0 62 24) 703-3 62

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-L	32,5 R, 32,5 R (Estrichzement)
CEM II/A-S	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 52,5
CEM IV/B	32,5

Putz- und Mauerbinder
Tragschichtbinder

Lengfurt
Homburger Straße 41, 97855 Triefenstein
Tel.: (0 93 95) 18-0
Fax: (0 93 95) 18-3 60

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/A-S	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5-NW, 42,5

Putz- und Mauerbinder
Tragschichtbinder

Schelklingen
Postfach 67, 89598 Schelklingen
Zementwerk 1/1, 89601 Schelklingen
Tel.: (0 73 94) 2 41-0
Fax: (0 73 94) 2 41-4 17

CEM I	32,5 R, 32,5-NW/HS, 32,5 R-HS, 32,5 R/SE, 32,5 R-HS/SE, 42,5 R, 42,5 R-HS, 52,5, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R, 42,5 R
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Weisenau
Postfach 26 11 64, 55057 Mainz
Wormser Straße 190, 55130 Mainz
Tel.: (0 61 31) 8 05-0
Fax: (0 61 31) 8 05-5 54

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R, 32,5 R-st
CEM II/A-S	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R, 42,5 R
CEM III/A	32,5, 32,5-NA
CEM III/B	32,5-NW/HS
Putz- und Mauerbinder MC 5	

LAFARGE ZEMENT

KARSDORFER ZEMENT GmbH
Straße der Einheit 25
06638 Karsdorf/Unstrut
Tel.: (03 44 61) 73
Fax: (03 44 61) 74 1 18

CEM I	32,5 R, 32,5 R-HS, 32,5 R-st, 42,5 R, 42,5 R-HS, 52,5 R-ft, 52,5 R-ls
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/A-S	52,5 R, 52, 5 R-sp
CEM II/B-S	32,5 R, 42,5 R
CEM III/A	32,5-NW/NA
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

Werk:

Sötenich
Rinner Straße 27
53925 Kall-Sötenich
Tel.: (0 24 41) 99 11-0
Fax: (0 24 41) 99 11-44

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5 R

Zementwerk Lübeck GmbH & Co. KG
Postfach 14 02 20, 23517 Lübeck
Möllerung 19–21, 23569 Lübeck
Tel.: (04 51) 30 60 85/86
Fax: (04 51) 3 07 90-21
E-mail: zementwerk-luebeck@t-online.de

CEM I	32,5 R, 32,5 R-NA, 42,5 R, 42,5 R-NA, 42,5-NA
CEM II/B-S	32,5 R-NA
CEM III/A	32,5, 32,5-NA, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

Märker

Märker Zementwerk GmbH
Postfach 20, 86654 Harburg
Oskar-Märker-Straße 24, 86655 Harburg
Tel.: (0 90 80) 8-0
Tel., Versand: (0 90 80) 82 34
Fax, Technik: (0 90 80) 83 03
Fax, Verwaltung: (0 90 80) 83 70

CEM I	32,5 R, 32,5 R-st, 42,5 R, 52,5 R, 52,5, 42,5 R-se
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5
CEM III/B	32,5-NW/HS
Putz- und Mauerbinder MC 5	
Tragschichtbinder HT 35	

Phoenix Zementwerke Krogbeumker GmbH & Co. KG
Postfach 17 62, 59247 Beckum
Stromberger Straße 201, 59269 Beckum
Tel.: (0 25 21) 8 47-0
Fax: (0 25 21) 8 47-50

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 42,5 R-yt
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/A-S	42,5 R
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS
CEM III/C	32,5 (GB)

Readymix Zement

Readymix Hüttenzement GmbH
Postfach 14 01 60, 44321 Dortmund
Im Karrenberg 36, 44329 Dortmund
Tel.: (02 31) 8 95 01-0
Fax: (02 31) 8 95 01-1 46

CEM III/A	32,5, 42,5, 52,5
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA, 42,5-NW/HS/NA

Readymix Westzement GmbH & Co. KG
Postfach 17 54, 59247 Beckum
Am Kollenbach 27, 59269 Beckum
Tel.: (0 25 21) 1 57-0
Fax: (0 25 21) 1 57-1 75

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 42,5 R-HS, 52,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 42,5, 52,5
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA, 42,5-NW/HS/NA
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Werke:

Beckum-Kollenbach
Beckum-Mersmann
(jeweils mit obiger Anschrift)

Schwelgern
Postfach 11 05 61, 47145 Duisburg
Kaiser-Wilhelm-Straße 100
47166 Duisburg
Tel.: (02 03) 5 22 47 17
Fax: (02 03) 55 88 52

Rüdersdorfer Zement GmbH
Postfach 13/14, 15558 Rüdersdorf
Frankfurter Chaussee, 15562 Rüdersdorf
Tel.: (03 36 38) 54-0
Fax: (03 36 38) 54-2 22

Werke:

Rüdersdorf
(mit obiger Anschrift)

Eisenhüttenstadt
Oderlandstraße, 15890 Eisenhüttenstadt
Tel.: (0 33 64) 2 95-0
Fax: (0 33 64) 2 95-2 30

CEM I 32,5 R, 32,5 R-st, 32,5 R-re, 32,5 R-NA, 42,5 R, 42,5 R-pb, 42,5 R-NA, 52,5 R-ft
CEM II/B-S 32,5 R, 42,5 R
CEM III/A 32,5-NA/NW, 42,5 R-NA
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA
Tragschichtbinder HT 35,
Sonderprodukte

ROHRBACH ZEMENT

Rohrbach Zement GmbH & Co. KG
72259 Dotternhausen
Tel.: (0 74 27) 79-0
Fax: (0 74 27) 79-2 01
E-mail: info@rohrbach-zement.de
Internet: www.rohrbach-zement.de

CEM II/B-T 32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/B-T 32,5 R-tm TERRAMENT®
CEM II/B-T 42,5 R-tm TERRAMENT®
CEM I 32,5 R-st, 42,5 R
Werktrockenmörtel
Spezialbindemittel

Zementwerk Saar GmbH
Firmensitz:
Hohenzollernstraße 8
66333 Völklingen
Kundenbetreuung:
Matériaux S.A. Abteilung ZWS
2a, Kalchesbruck
L-1852 Luxembourg
Tel.: (0 03 52) 43 88 11
Fax: (0 03 52) 42 08 44

CEM I	42,5 R, 52,5
CEM II/B-S	32,5 R, 42,5
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

E. Schwenk Zementwerke KG
Hauptverwaltung
Postfach 38 50, 89028 Ulm
Hindenburgring 15, 89077 Ulm
Tel.: (07 31) 93 41-0
Fax: (07 31) 93 41-4 16

Werke:

Allmendingen
Postfach 51, 89602 Allmendingen
Fabrikstraße, 89604 Allmendingen
Tel.: (0 73 91) 5 81-0
Fax: (0 73 91) 5 81-1 06

CEM I	32,5 R, 32,5 R-HS, 32,5-HS, 32,5-NW/HS, 42,5 R, 42,5 R-HS
CEM II/A-L	32,5 R

Putz- und Mauerbinder MC 5

Karlstadt
Postfach 13 51, 97749 Karlstadt
Laudenbacher Weg 5, 97753 Karlstadt
Tel.: (0 93 53) 797-0
Fax: (0 93 53) 797-1 38

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 42,5 R-az, 52,5 R
CEM II/A-S	32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5, 52,5 R
CEM III/B	32,5-NW/HS, 42,5-NW/HS
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Mergelstetten
Postfach 18 29, 89508 Heidenheim
Hainenbachstraße 30, 89522 Heidenheim
Tel.: (0 73 21) 3 10-0
Fax: (0 73 21) 3 10-1 13

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 42,5-sb, 42,5 R-SE, 52,5, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5, 32,5-NW
Tragschichtbinder HT 35	
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Schwenk Zement Bernburg GmbH & Co. KG
Verwaltung Nienburg
Postfach 23, 06426 Nienburg
Calbesche Straße 67, 06429 Nienburg
Tel.: (03 47 21) 60-0
Fax: (03 47 21) 60-1 70

Werk Bernburg
Altenburger Chaussee
06406 Bernburg
Tel.: (0 34 71) 3 58-0
Fax: (0 34 71) 3 58-1 00

CEM I	32,5 R, 32,5 R-sd, 32,5 R-HS, 42,5 R, 42,5 R-HS, 42,5-ez, 42,5 R-ra, 52,5 R, 52,5 R-bs, 52,5 R-ft

TEUTONIA Zementwerk
Aktiengesellschaft
Postfach 73 03 65, 30552 Hannover
Lohweg 34, 30559 Hannover
Tel.: (05 11) 58 69-0
Fax: (05 11) 58 69-2 00
E-mail:
TEUTONIA.ZEMENT@t-online.de

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/B-S 32,5 R
CEM III/A 32,5, 32,5-NW
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA
Putz- und Mauerbinder MC 5

Tubag

TUBAG Trass-, Zement- und
Steinwerke GmbH
Postfach 11 80, 56638 Kruft
Bundesstraße, 56642 Kruft
Tel.: (0 26 52) 81-0
Fax: (0 26 52) 81-3 33

CEM II/B-P 32,5
CEM IV/B 32,5
CEM V/A 42,5 R

Südbayerisches
Portland-Zementwerk
Gebr. Wiesböck & Co. GmbH
Sinning 1, 83101 Rohrdorf
Tel.: (0 80 32) 1 82-0
Fax: (0 80 32) 1 82-1 97
E-mail:
RBV@Zementwerk-Rohrdorf.de

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 32,5 R-SE
CEM II/A-S 32,5 R
CEM II/B-S 32,5 R
CEM III/A 32,5 R-NW
Sonderprodukte für Umwelt und Tiefbau

Wittekind

Portlandzementwerk Wittekind
Hugo Miebach Söhne
Postfach 11 06, 59592 Erwitte
Hüchtchenweg 1, 59597 Erwitte
Tel.: (0 29 43) 8 93-0
Fax: (0 29 43) 8 93-1 53

CEM I	32,5 R, 42,5, 42,5 R, 42,5 R-NA, 52,5, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM III/A	42,5
Putz- und Mauerbinder MC 5	

Wössinger Zement GmbH
Postfach 11 61, 75039 Walzbachtal
Bruchsaler Straße 56, 75045 Walzbachtal
Tel.: (0 72 03) 89-0
Fax: (0 72 03) 89-1 99

CEM I	32,5 R, 32,5 R-st, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

WOTAN

Portlandzementwerk „Wotan"
H. Schneider KG
U. I. Hähnchen 1, 54579 Üxheim
Tel.: (0 26 96) 9 22-0
Fax: (0 26 96) 9 22-1 41

CEM I	32,5 R, 42,5
CEM II/B-S	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA

ZEAG

ZEAG Zementwerk Lauffen –
Elektrizitätswerk Heilbronn AG
Hauptverwaltung
Postfach 16 51, 74006 Heilbronn
Badstraße 80, 74072 Heilbronn
Tel.: (07131) 610-0
Fax: (07131) 610-183

Werk:

Lauffen
Postfach 3 40, 74345 Lauffen
Oskar-von-Miller-Straße 48
74348 Lauffen
Tel.: (07133) 102-0
Fax: (07133) 102-3040

CEM I	32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-S	32,5 R
CEM III/A	32,5, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

Bernburg (Fortsetzung)

CEM II/A-L 32,5 R
CEM II/A-S 42,5 R
CEM II/B-S 32,5 R, 42,5 R
CEM II/B-P 32,5
CEM III/A 32,5, 32,5 NA, 32,5-NW/NA
CEM III/B 32,5-NW/HS/NA
Tragschichtbinder HT 35

Sebald Zement GmbH
Postfach 1, 91222 Pommelsbrunn
Hartmannshof, Hunaser Straße 3,
91224 Pommelsbrunn
Tel.: (0 91 54) 49-0
Fax: (0 91 54) 49-66

CEM I 32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-L 32,5 R
Putz- und Mauerbinder

Portland-Zementwerke Gebr. Seibel GmbH & Co. KG
Postfach 11 44, 59592 Erwitte
Bahnhofstraße 40, 59597 Erwitte
Tel.: (0 29 43) 20 51
Fax: (0 29 43) 20 55

CEM I 32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM III/A 32,5 R
CEM III/B 42,5-NW/HS/NA

Portland-Zementwerke Seibel u. Söhne oHG
Postfach 10 64, 59591 Erwitte
Berger Straße 100, 59597 Erwitte
Tel.: (0 29 43) 97 32-0
Fax: (0 29 43) 97 32-29

CEM I 32,5 R, 42,5 R
CEM II/A-L 32,5 R
CEM II/B-S 32,5 R
CEM III/A 32,5
Putz- und Mauerbinder MC 5

Solnhofer Portland-Zementwerke Aktiengesellschaft
Postfach 9, 91807 Solnhofen
Fraunberger Weg 20, 91807 Solnhofen
Tel.: (0 91 45) 6 01-01
Fax: (0 91 45) 6 01-2 70

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 52,5 R
CEM II/A-L	32,5 R
CEM II/A-S	32,5 R
CEM II/B-P	32,5
CEM III/A	32,5, 32,5-NW, 42,5
CEM III/B	32,5-NW/HS

Putz- und Mauerbinder

spenner zement

Spenner Zement GmbH & Co. KG
Postfach 11 26, 59592 Erwitte
Hüchtchenweg, 59597 Erwitte
Tel.: (0 29 43) 9 86-0
Fax: (0 29 43) 9 86-2 22

Werke:
Diamant
Felsenfest
Nordstern

CEM I	32,5 R, 42,5 R, 42,5 R-HS, 42,5 R-FT 42,5 R-SE Spritzbetonzement, 52,5 R
CEM II/B-P	32,5 R
CEM II/B-S	32,5 R
CEM III/A	32,5-NW/NA, 42,5-NA
CEM III/B	32,5-NW/HS/NA, 42,5-NW/HS/NA

Putz- und Mauerbinder MC 5
Sonderprodukte